

東京大学大学院新領域創成科学研究科

社会文化環境学専攻

2021 年度

修 士 論 文

マルチエージェントシミュレーションを用いた 2025 大阪

万博の交通マネジメント施策の分析

Analysis of traffic management measures for Expo 2025 Osaka using

multi-agent simulation

2022 年 1 月 17 日提出

指導教員 日下部 貴彦 准教授

安岡 祐介

Yasuoka, Yusuke

目次

1 章 序論.....	3
2 章 背景 万博開催時交通の需要と供給	5
2-1. 鉄道の輸送人数の算出方法	5
2-2. 自動車・海路での輸送人数の算出方法	5
2-3. 夢洲への交通手段と最大容量.....	6
2-4. 想定される追加需要と本研究のシミュレーション対象となる需要の算出	8
3 章 関連研究 イベント時の混雑緩和施策とマルチエージェントシミュレーションについて	11
3-1. 短期イベントにおける TDM について	11
3-2. 大規模イベントにおける交通の特徴.....	11
3-3. マルチエージェントシミュレーション	12
3-4. MATSim.....	13
4 章 構築 大阪都市圏のデータとその処理	14
4-1. MATSim の入力データの形式	14
4-2. 各入力ファイルの作成.....	15
4-2.1 交通網の作成.....	15
4-2.2 車両情報の作成.....	16
4-2.3 ダイアグラムの作成.....	17
4-2.4 エージェントの移動シナリオの作成	17
5 章 性能評価 現況・万博時シミュレーションの結果	20
5-1. シミュレーションのシナリオの精度の確認.....	20
5-2. 通常時の大阪都市圏の移動需要への影響考察	21
5-3. 大阪メトロ中央線・御堂筋線の混雑率の検証	24
5-4. シナリオ間で大きな変化が起きた駅の絞り込み.....	25
6 章 提案 万博開催時における効率的なシャトルバス運用方法.....	28
6-1. バスの運用方法最適化問題の定式化.....	28
6-2. シャトルバス運用方法.....	29
7 章 実験結果と議論 シャトルバスの運用効果の測定	31
7-1. 移動不可能エージェントの検証.....	31
7-2. 通常時の大阪都市圏の移動需要の移動時間の検証.....	31
7-3. シャトルバスの運行方法に対する考察	33
7-4. 万博開催時交通の需要と供給計画への貢献.....	33
8 章 結論.....	35
8-1. 研究の目的と発見事項のまとめ	35

8-2. 本研究の限界と今後の展望	35
謝辞.....	36
参考資料	37
付録.....	39
最適化問題の解法	39
シミュレーションの収束状況.....	41
通常シナリオ	41
万博シナリオ	41
シャトルバスシナリオ	42

1 章 序論

2025 年に大阪府大阪市にて、万国博覧会（以下、万博と呼ぶ）が開催される予定[1]であり、会場としては市街地から 15km 離れた夢洲(大阪市此花区)という人工島が選ばれた。万博は 5 年に 1 度開かれる博覧会であり、現代の技術・芸術の最先端を展示する場ともなっている。世界各国の人々の交流の場としての側面もあり、2005 年日本国際博覧会（愛・地球博）では 2,200 万人（内外国人旅行者が 100 万人強）が来場する大規模なイベントとなった。2025 万博の総来場者数見込みは 2820 万人でピーク日には 28.5 万人が来場すると推定されている。

このような大規模なイベントでは、開始前の数時間と終了直後に大きな交通需要が突発的に発生し、遠方からの来場者が多いため影響範囲が大きいことが特徴である。そのため対応策としては公共交通料金の割引・割り増しによる地理的分散や、プレ・アフターイベントでの需要の時間的分散の手段がとられることが多い。[2]

経済産業省の発表した資料によると、この移動需要に対して大阪メトロ中央線の延伸による鉄道ルート追加と、車・タクシーなどの自動車、シャトルバスで対応するとしている。[1] しかし、経済産業省が想定する輸送量は会場や輸送力、来場者数の前提が大きく異なる 1990 年の大阪花博から算出しており、この計画にはいくつか実現が疑われる点が残る。輸送計画の柱である大阪メトロ中央線は現時点でも一部で通勤時 130~140%の混雑をする路線であり、万博の入場ピークの一つである 9 時に追加の需要を受け入れるキャパシティがあるとは考え難い。同路線は大阪の主交通手段である御堂筋線や JR 各線との乗り換え需要もあり、混雑すれば大阪の交通網全体に影響があると考えられる。また、会場である夢洲には夢米大橋と夢咲トンネルの 2 つしか自動車道のルートが存在せず、輸送計画で大きな配分がなされているシャトルバスが想定動きができない可能性が高い。大阪万博は 6 か月と長期間開かれるイベントであり、輸送計画に無理があれば通勤や通学といった移動の需要にも影響を与える可能性がある。

本研究の対象である万博の交通において特徴的であるのは、

1. 来場する個人は繰り返しの行動を行わないことから、従来交通計画で用いられている均衡分析での対象にならない点
 2. 経路が大きく限定された人工島で開催されるため、地理的分散でとれる対策が限定される点
 3. 想定来場者に対して会場規模が極端に小さく、来場者を会場に留める形での時間的分散策を行う事ができない点
 4. 需要が鉄道輸送力を上回る点
- の 4 点である。

本研究ではこれらの特徴を持つ万博時の交通に対して、マルチエージェントシミュレーションを用いて大阪万博における輸送現在計画が現況の交通に与える影響を考察し、さら

にその影響を緩和するための施策を提案し、その効果を検証することを目的とする。



図 1 万博会場の位置(OpenStreetMap[openstreetmap.org]より)

本論文の構成は次の通りである。第 1 章では研究背景と目的を述べた。第 2 章では、夢洲に接続しうる交通手段とその最大容量について説明をする。その後どのような需要が発生するのかを確認し、その中でも本研究の対象となる需要算出の詳細を記す。第 3 章では関連研究として交通需要マネジメント(TDM: Transportation Demand Management)の概要と大規模なイベントにおける需要緩和に関して説明をする。さらに、本研究で用いるマルチエージェントシミュレーションという手法と、使用するソフト MATSim の特徴を記す。第 4 章では、実際に行ったデータの処理の詳細を示した。第 5 章では関西圏の交通網と万博時の交通についての再現に関しての制度の評価を行った。第 6 章では 5 章を踏まえてシャトルバスの最適な運用方法の定式化とその問題の解を記した。第 7 章では 6 章で導いた運用方法をシミュレーション上で実装した結果と、それに対する考察を行った。第 8 章では本研究の立てた課題と実験で得られた知見、及び本研究の限界を記した。

2章 背景 万博開催時交通の需要と供給

2-1. 鉄道の輸送人数の算出方法

人工島である夢洲への交通手段は限定的であり、大阪メトロ中央線・自動車・海路の3つが輸送手段として考えられる。

鉄道車両の定員とは、客室部分の座席定員と立席定員を加えた数を指す。航空機や乗用車における定員とは違い、鉄道における定員はサービス定員とも呼ばれ、定員を超える乗車をしてもよいことになっている。実際の乗車人数を定員で割ったものを混雑率と呼び、国土交通省が示す[3]目安として混雑率の基準は下図のとおりである。

混雑度の目安

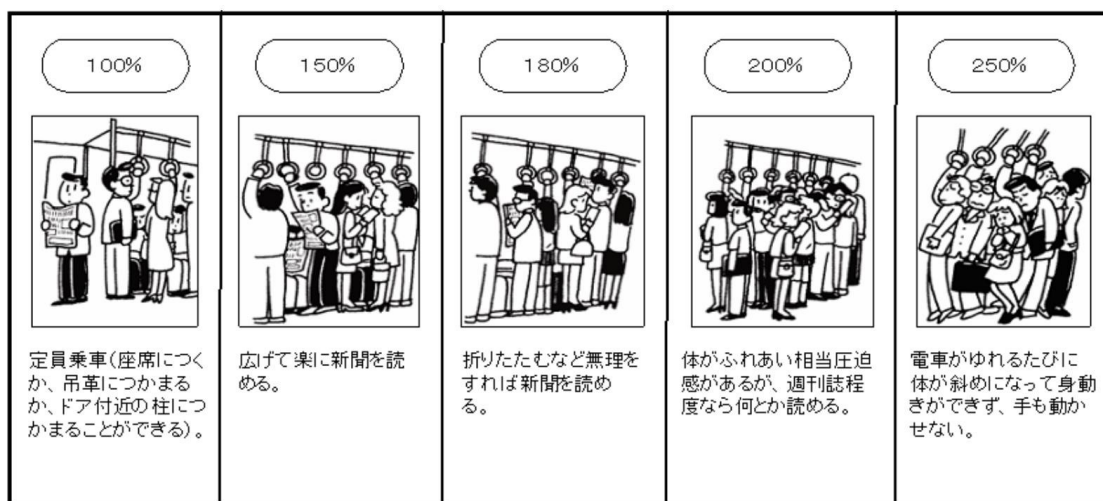


図 2 混雑度の目安 ([3]より)

この定義を用いると、鉄道が一時間に輸送可能な最大人数は先頭車両の定員を a_{first} (人)、中間車両の定員を a_{middle} (人)、車両数を b_{train} 、運行可能な最短発車間隔を τ_{train} (分)、想定する最大混雑率を $\alpha\%$ として

$$C_{train} = \alpha \{ 2a_{first} + a_{middle}(b_{train} - 2) \} \times \frac{60}{\tau_{train}} \quad (\text{人/時}) \quad (1)$$

と表すことができる。

2-2. 自動車・海路での輸送人数の算出方法

道路の交通容量は単位断面を一時間に通過しうる車両の台数で決められるが、現実においては車両が長い大型車の混入がある場合には通過できる車両数が減少する。そのため、交通容量は大型車一台が乗用車何分に相当するかを示す乗用車換算係数 (Passenger Car Equivalence: PCE) を用いて乗用車台数で表現される。単位は実際の通過台数ではなく、乗用車換算台数 (Passenger Car Unit: PCU) を用いて表現をする。[4]

まず乗用車のみが通行している状態では、自動車によって輸送可能な人数は乗用車に平均で乗車する人数を a_{car} 、夢洲に接続している各道路の交通容量をそれぞれ $C_{road,i}$ (pcu/時)、

夢洲に接続する各道路 $i \in B$ を実際に通る乗用車の台数を x_i^{car} として輸送される人数は

$$C_{car} = a_{car} \sum_{i \in B} x_i^{car} \quad (\text{人/時}) \quad (2)$$

$$s. t. x_i \leq C_{road,i} \text{ for } \forall i \in B$$

と表すことができる。

次に、ここにシャトルバスによる輸送が加わる場合はシャトルバスの乗用車換算係数を ϵ 、各道路を通るシャトルバスの台数を x_i^{bus} 、シャトルバスの定員を a_{bus} として、輸送される人数は

$$C_{car+bus} = a_{bus} \sum_{i \in B} x_i^{bus} + a_{car} \sum_{i \in B} x_i^{car} \quad (3)$$

$$s. t. x_i^{car} + \epsilon x_i^{bus} \leq C_{road,i} \text{ for } \forall i \in B$$

となる。

上式から、シャトルバスの必要台数を求める。乗用車またはシャトルバスで運ぶべき需要 X 人が所与の時、交通容量を使い切るとして

$$C_{car+bus} = a_{bus} \sum_{i \in B} x_i^{bus} + a_{car} \sum_{i \in B} x_i^{car} \geq X \quad (4)$$

$$x_i^{car} + \epsilon x_i^{bus} = C_{road,i} \text{ for } \forall i \in B$$

のため、シャトルバスの最低必要台数は

$$\sum_{i \in B} x_i^{bus} = \frac{X - a_{car} \sum_{i \in B} C_{road,i}}{(a_{bus} - \epsilon)} \quad (5)$$

として求められる。このときシャトルバスで最低限輸送する必要がある人数の下限は

$$C_{bus}(X) = a_{bus} \frac{X - a_{car} \sum_{i \in B} C_{road,i}}{(a_{bus} - \epsilon)} \quad (6)$$

である。

海路での輸送においては、バースの数を C_{port} 、旅客の定員を a_{ferry} 、運航可能な最短間隔を τ_{ferry} (分)として輸送可能な最大人数は

$$C_{ferry} = a_{ferry} C_{port} \times \frac{60}{\tau_{ferry}} \quad (7)$$

である。

2-3. 夢洲への交通手段と最大容量

大阪メトロ中央線は大阪市高速電気軌道株式会社が運営する地下鉄の路線である。東端の長田駅では近鉄けいはんな線と乗り入れを行っており、奈良県からの通勤客の輸送や大阪の東西方向の交通を担っている。内閣官房国際博覧会推進本部の資料[5]によると、2025年までに現在の終点であるコスモスクエア駅から路線を延伸することで万博時の交通手段を拡張するとしている。この路線は $b_{train} = 6$ 両編成(先頭車両定員 a_{first} :130名,中央車両定員 a_{middle} :140名)であり、最大で2.5分間隔での運行が可能であることから式(1)より39600人が見た目上輸送可能である。しかし、大阪メトロ中央線は朝100~130%程度の混雑率であるので、その分の輸送能力を差し引いて実際には C_{train} :15,750(人/時)が輸送能力の上限である。

夢洲には旅客を運べるようなバース数 C_{port} は、現在夢洲において大規模なバースの開発計画が存在していないことから一つと仮定する。小型旅客船の容量は a_{ferry} :600人程度であり、 τ_{ferry} :15分間隔で発着可能なため式(7)より C_{ferry} :2,400(人/時)が一時間当たりの輸送可能人数である。

また、図1で示す通り夢洲は人工島であるので陸上経路は舞洲と接続する夢舞大橋と、咲州とつなぐ夢咲トンネルの2経路しか存在しない。夢舞大橋は片側3車線、夢咲トンネルは往復分離式片側2車線道路なので、多車線道路設計で一般的の用いられている自動車容量である2,200pcu/時[4]を用いるとそれぞれ $C_{road,夢舞}$:6,600pcu/時 $C_{road,夢咲}$:4,400pcu/時となる。一台当たり乗客数 a_{car} を平均2.5人とする、式(2)を用いて C_{car} :27,500(人/時)が乗用車交通の上限であると考えられる。

ここで、大阪万博登録書[7]によると一時間当たりのピーク時来場者数は入場5.9万人、退場が5.5万人であり、追加需要の各種公共交通の分担率は下図3に示すとおりである。

図3-9: 想定する1日当たりの乗客数と交通手段の利用率(ピーク時)

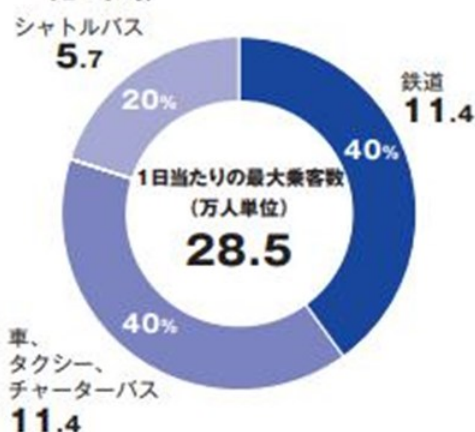


図3 ピーク時の追加需要の交通分担([7]より引用)

これをもとに各交通がピーク時に輸送すべき人数を算出し、交通の上限と比較したものが下表1である。鉄道を除いた車・シャトルバスの合計輸送人数は4.4万人であり、上記の乗用車の輸送人数の上限を超過している。この輸送人数をみたすために式(5)(6)に $X=44000$ (人)を代入すると、シャトルバスの必要台数は366台、輸送する必要がある最低人数は18,333人である。

なお、これらの計算はあくまで万博の輸送に交通車線のすべてを利用できた場合の数値を用いている。実際には夢洲ターミナルのコンテナ輸送の物流トラックが存在しているため、実際にはこの数値よりも多くのシャトルバスを使用する必要があると考えられる。

表 1 ピーク時に輸送すべき人数と交通容量

	輸送可能な人数 (人)	想定されている 輸送人数 (人)	本研究の 想定輸送人数 (人)
鉄道	16,000	24,000	16,000
車・タクシー・ チャーターバス	27,500	24,000	25,667
シャトルバス	-	12,000	18,333
海路	2,400	-	-
	45,900	60,000	60,000

2-4. 想定される追加需要と本研究のシミュレーション対象となる需要の算出

需要側を考えると、万博によって発生する交通はと仮定して、本研究の対象外とした。表 2 のとおりである。本研究ではあくまで万博開催時の短時間での一斉来場・退場による影響を考えるために、5 の空港から夢洲以外の場所への移動と 6,7 のスタッフの移動、8 の派生交通は対象外とした。また、直接空港から来場する来場者は少ないと考え、今回のシミュレーションでは海外含む他地域から飛行機を利用する人間は一旦宿泊して万博会場に来場すると仮定して、本研究の対象外とした。

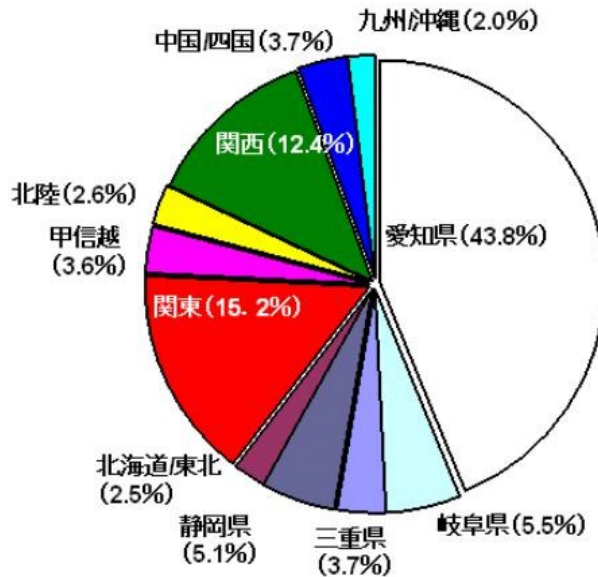
表 2 万博によって発生する需要一覧

No. 発生する交通の種類	本研究の対象
1 新幹線から来場する交通	○
2 宿泊地から来場する交通	○
3 関西在住者・地元から来場する交通	○
4 空港から宿泊地に向かう交通	×
5 空港から直接万博に向かう交通	×
6 万博の運営に伴って生じる交通	×
7 万博の従業員等の通勤・帰宅の交通	×
8 1~7によって各地で派生的に生じる交通	×

追加需要 1~3 の合計を簡単のため 20 万人とした。愛知万博公式ホームページによると、万博開催地の都市圏内からくる来場者は約 65%程度である(図 4)。

全国各方面から来場

- 全国各方面から来場した。



- 「大阪花博」(1990年)や「つくば科学博」(1985年)に比べ、「愛・地球博」への地元来場者の比率は低い。

	関東		関西		東海・北陸		その他	
	実数	%	実数	%	実数	%	実数	%
愛・地球博	567	15.2	458	12.3	2271	60.9	432	11.6
つくば博	4016	74.5	220	4.1	586	10.9	566	10.5
大阪花博	226	11.1	1305	64.2	218	10.7	283	13.9

図 4 地元来場者の比率 ([8]より)

また万博登録申請書[7]によると追加需要のうち自動車・車・チャーターバスで分担をするのは 40%(図 3)であり、そのうち地元の人間の自家用車による来場は半数程度であると考えると 40,000 人が自動車による来場者であると仮定した。残りの 16 万人に関しては公共交通を用いて近くに移動したのちにシャトルバスに乗る、もしくはそのまま夢洲に中央線を用いて来場するとした。さらに地元来場者の残り 9 万人は鉄道を使って万博会場に来場すると設定した。

非地元来場者のなかでも新大阪を利用する人間の総数は、乗客数を a_c 人、東海道・三洋新幹線の来阪間隔を τ_c (分)、考慮する時間帯を t (時間)としたときに、

$$C_c = a_c \frac{60}{\tau_c} \times t \text{ (人)}$$

と表せる。9 時に開場し滞在が 6 間平均であることから、考慮する時間 t を 6 時間とした。また、乗客数は山陽・東海道新幹線がそれぞれ a_c :1280 人定員、 τ_c :4 分間隔で来阪するこ

とから C_c : 57600 人が新幹線需要であると設定した。

滞在時間については、どのような属性・交通で来場したエージェントであっても下で示す愛・地球博の平均滞在時間の分布と同じになるように滞在時間を設定した。

平均滞在時間

- 家族連れでの来場者や夜間入場者が多かったこと等により、平均滞在時間が6時間を越えた。



平均滞在時間: **6時間55分**

図 5 来場者の平均滞在時間 ([8])

表 3 今回の実験で想定した来場者の地元・交通分担の比率

地元の人間	他地域	総来場者数			
65%	35%	100%			
130,000	70,000	200,000			
自動車	その他 (公共交通機関+シャトルバス)	総来場者数			
20%	80%	100%			
40,000	160,000	200,000			
自動車	鉄道	新幹線	飛行機	宿泊	総来場者数
40,000	90,000	57,600	考慮しない	12,400	200,000

3章 関連研究 イベント時の混雑緩和施策とマルチエー

ントシミュレーションについて

3-1. 短期イベントにおける TDM について

交通需要マネジメント (TDM: Transportation Demand Management) とは、公共交通への需要転換や自動車の効率的利用など交通行動の変更を促し、発生交通量の抑制や集中の平準化など交通混雑を緩和していく取り組みである。連休や繁忙期・イベント発生時におけるピーク交通による交通円滑化に対応するために主要観光地やイベント時の施策として用いられる。特に近年では、鈴鹿市での例[9]のように AMMA (Area Marketing and Management Approach) と呼ばれる中長期的かつ包括的なエリアマネジメントの重要性が叫ばれている。一方で、今回の万博においてはイベントの規模・ステークホルダーの多さに比して対応可能な期間が短いので、長期的な交通の利便性の向上のための需給調整としての側面には触れずにイベントによる移動が地域住民に与える影響を最小にするための施策を考えたい。

このような対策の例において、坂井・日下部[2]は、1 起点・1 終点・1 ボトルネックのネットワークにおいて特別な道路課金ではなく、道路管理者が適切な時間に観光資源を投下することで総遅れ時間を短縮できることをモデル分析によって示唆している。本研究ではさらにシミュレーションを用いることで施策の効果を定量的に検証することを可能にしたい。

3-2. 大規模イベントにおける交通の特徴

牧野[10]によると大規模イベントの場合の交通集中には特徴があり、イベント開始前は比較的なだらかに交通需要が集中して直前にピークが発生し、イベント後では終了と同時に最大のピークが来る。これらの対象法には主に時間集中と空間集中の分散の 2 種があり、交通需要を分散する方法としては料金の割引やプレ・アフターイベント、退出の順番がある。牧野はさらに専用軌道系においては集中が予想される駅で混雑チャージを行う、混雑する駅前後の利用してもらいたい駅でのポイント還元や割引や駅から会場までの歩ける空間づくりが重要としている。実際に 2020 年に行われた東京オリンピックでは、大会輸送度影響マップを開示することによって通勤利用の人々に時差通勤やテレワークを呼びかける対策をとっている。[11]

本研究の対象とする大阪万博においても上記の特徴はよくあてはまる一方で、東京オリンピックで行った施策でも、今回は実施が不可能なものも多い。夢咲トンネルは車両専用のトンネルであり、一つ離れたコスモスクエア駅には徒歩で移動することができないため、前後の駅を利用してもらおうような施策をすることはできない。また、夢洲会場は面積が狭いためプレ・アフターイベントで人を滞在させることは望ましくない。このような特徴から、施策として有用なものは

- ① シャトルバスによるピストン輸送
- ② 輸送度影響マップの開示

③ 通勤への呼びかけ

④ 退出管理

に限られる。本研究においては比較的シミュレーション上で影響を定量的に測定がしやすい①シャトルバスの運用に関して効率的な手段とその効果検証を考察するものとする。

3-3. マルチエージェントシミュレーション

交通においては、施策を検討・実施する上では交通利用者・事業者・住民のなどのステークホルダーの合意をとる必要があるが、その調整のためには説得力のある定量的な評価指標が必要であることが多い。しかし交通現象は複雑現象であり、その地域の人々の生活とも不可分であるため、繰り返し実証実験を行うことはコスト・時間の両面から非現実的である。このような性質から、実世界では観測不可能な現象をコンピュータ上で疑似再現するシミュレーションを利用することも多い。シミュレーションを用いることによって将来の状況に対して定量的に評価できることに加え、可視化によって定性的な状況の把握も可能になる。

北上[12]によると、従来の交通シミュレーションの多くは交通利用者が交通状況全体を考慮して最適な行動を行うことを前提としており、各利用者が経験をもとに個人最適な行動をとる現実の交通需要と乖離する可能性がある。また、渋滞を解消しても利用者の満足度を下げってしまうような施策になる恐れがあるので、これらのことを考慮したシミュレーションが施策評価には望ましいとしている。本研究で扱うマルチエージェントシミュレーション(以下、MAS とする)はシミュレーションの一種であり、一定のルール・行動原則に従う自律的な行動主体がコンピュータ上で同時に行動を行い、その相互作用によって生まれる系全体の動きを分析するものである。このような性格から、現実社会の人間の行動規範の多様性や情報の局在性をうまく再現できる点が強みである。

また、万博時の公共交通を扱う本研究においては多様な交通モードに対応する必要があることに加え、時間帯によるネットワークの状態を分析することや広範なエリアを扱うことが求められる。本研究において求められる要件と一般的に交通シミュレーションに用いられる各ソフトの特徴をまとめたものが表 4 である。

表 4 本研究の要件と各交通検討手法の特徴 ([13]を参考に作成)

要件	既往手段	今回の要件	Visum	均衡配分 (四段階推定)	MATSim
分析単位			フロー	フロー	個人
対象交通手段		公共交通（電車・バス）を含むこと	マルチモード	マルチモード	マルチモード
選択肢集合		潜在的		明示的	潜在的
行動データ		-	トリップチェーン	トリップ	一日のチェーン
時間分解能		連続した時間帯別	動的・連続した時間帯別	静的・一日の平均的交通	動的・連続した時間帯別
対象範囲		都市圏	都市圏	都市圏	都市圏
対象の評価指標		イベント開催地や乗り換え地点での滞在・滞留の評価	ネットワークパフォーマンス・運航スケジュール最適	ネットワーク均衡	個人の効用ベース

3-4. MATSim

本研究では、交通系シミュレーションの中でも著名な MATSim を用いる。MATSim[14] は TU Berlin と ETH Zurich 開発されたオープンソースシミュレーションである。オープンソースであり現在も十分にメンテナンスがなされていることから、本研究ではこれを採用する。

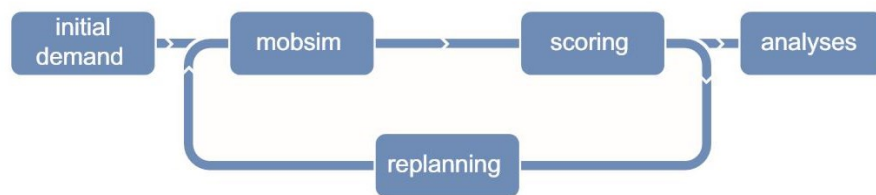


図 6 MATSim の計算フロー ([15]より転載)

MATSim は、エージェントの一日のタイムスケジュールから計算したスコアが大きくなるように移動経路や時間を探索しながら繰り返し計算することでシミュレーションを行う。本研究では、エージェントの移動手段は徒歩、自動車、公共交通（鉄道のみ）、シャトルバスを設定し、計算を行う。計算結果は xml の形で取得可能であり、この分析を通じて各エージェントの詳細な動きを確認することができる。また可視化ツールによってアニメーション化することも可能である[16]。

4 章 構築 大阪都市圏のデータとその処理

4-1. MATSim の入力データの形式

前章で説明した MATSim によるシミュレーションを行うために、入力データを作成した。

入力データは

- ① 人や各種車両が動く交通網(Network)
- ② バス・電車などの車両の容量・長さ・速度などの情報(Transit Vehicle)
- ③ バス・電車のダイヤグラム (Transit Schedule)
- ④ エージェントの初期移動計画 (Plan)
- ⑤ ファイル群のバスや計算の設定(Config)

の 5 つである(括弧内は MATSim 上での名称)。各種入力データの加工元と詳細は表 5 に示す。①交通網のデータではグラフ理論の木構造同様の形でエージェントの移動できるフィールドを作成する必要がある、そのためにノードとエッジを定義する必要がある。②車両情報データでは、着席定員と立席定員や車両の長さといった情報と車両エージェントの定義をする。③ダイヤグラムでは関西の各路線と定義した各ノードとエッジの対応、出発駅を発車する時刻と出発後他の駅に到着に必要な時間、その路線を走る車両エージェントを示す。④初期移動計画では各エージェントの発生位置、移動目的と到着時間、その目的地での滞在時間などを記載した。また、本研究では計算時間の短縮のために、エージェントの数を 1/40 に縮小処理を行った。⑤設定ファイルでは各種計算のためのパラメータの設定やシナリオ全体の時間を記した。表 5 で各入力データとそこで定義される項目を整理した。

表 5 適用条件

対象地域	大阪都市圏（大阪府、兵庫県、京都府、奈良県、和歌山県の一部）
対象時間	平日の午前4時30分から 翌日の午前4時半までの24時間
行動データ	<ul style="list-style-type: none"> ■元データ：H27大都市交通センサス (調査時期：平成 27年 10月から 11月) ■入力項目 ・アクティビティ（データ形式：個人ID, 開始時刻, 終了時刻, タイプ, 活動場所） ・アクティビティの種類 (Home, Work, Leisure) ・トリップ (データ形式：個人ID, 出発時刻, 到着時刻, 出発地, 到着地, 交通手段)
入出力データ	<ul style="list-style-type: none"> ■元データ：株式会社駅探提供のデータ、鉄道各社の公表値 ・ダイヤ：各社が公開している時刻表と株式会社駅探提供のデータから作成 ・運行時間帯：4時30分から 27時30分 ・列車種別:普通と特急料金のかからない優等列車
車両情報	<ul style="list-style-type: none"> ■元データ：車両メーカーの公表値 ・車両：大阪メトロ中央線を除く全路線共通：1編成 79体 (実数換算:3160人) <li style="padding-left: 20px;">大阪メトロ中央線：1編成 48体 (実数換算:1920人) <li style="padding-left: 20px;">シャトルバス：1編成 1体 (実数換算:40人)
交通網	<ul style="list-style-type: none"> ■元データ：国土数値情報データ ■公共交通（鉄道のみ） ・鉄道ネットワーク (Node: 1166, Link: 2934) ■徒歩 道路ネットワーク上を移動
パラメータ	MATSimのデフォルト値を使用

4-2. 各入力ファイルの作成

4-2.1 交通網の作成

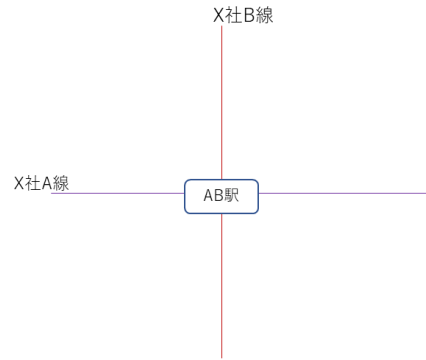
国土交通省が提供している国土数値情報の鉄道時系列データ [17]を用いて交通網情報を作成した。鉄道時系列データは全国の旅客鉄道・軌道の路線や駅の開業・廃止情報、路線名等などの変遷情報を路線形状（線）、駅位置（点）ごとに時系列的に整備したものである。

関西の現行路線の駅位置情報を抜き出してテーブル情報に変換したのちに、エージェントが乗り換え可能にするために主要な結節点の座標が同一になるようにした。さらに、夢洲駅を夢洲内の適当な座標内に設定して大阪メトロ中央線の駅に設定した。また、終点・起点駅にフラグを立て、各駅間を有向辺で結んだ。

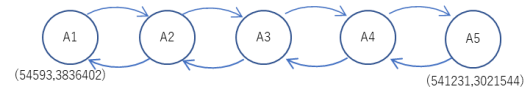
駅名	路線	X	Y
A1駅	A線	135.4971	34.75875
A2駅	A線	135.4985	34.7411
A3駅	A線	135.4985	34.73279
A4駅	A線	135.4986	34.72655
A5駅	A線	135.4971	34.71136

- ・ X,Y座標をUTM座標系に変換する(53経度帯)
- ・ 始発・終着駅のフラグを立てる

駅名	路線	X	Y	始発	終着
A1駅	A線	54393	386402	1	0
A2駅	A線	54320	408455	0	0
A3駅	A線	51305	343279	0	0
A4駅	A線	47016	312355	0	0
A5駅	A線	59321	301236	0	1



乗り換え可能な駅ではx,y座標を同一にした



有向グラフなのでエッジを二重に用意する

図 7 交通網データの加工方法



図 8 今回再現した関西鉄道網の全体図

4-2.2 車両情報の作成

簡単のために、大阪メトロ中央線用を走る車両、その他の路線を走る車両、シャトルバスの 3 種類の車両を用意して、シミュレーション上で動く車両エージェントの詳細データを

作成した。その他の路線を走る車両は御堂筋線の大阪市交通局 30000 系の数値を代表させた。

近畿車輛株式会社[18]の情報を参考にすると大阪メトロ中央線の定員は 820 人、それ以外の路線の定員は 1380 人であるが、2-1. 鉄道の輸送人数の算出方法節で述べたように鉄道の定員はサービス定員であり実際の輸送可能人数とは一致しない。そのため混雑率を 230% まで許し、それぞれ中央線で 1886 人、その他の路線で 3174 人まで乗車可能であると仮定した。縮小処理を行い、それぞれの定員を圧縮して中央線 48 エージェント、そのほかの路線で 79 エージェントまで乗車可能とした。

シャトルバスの定員は小型バスの一般的な定員 50 人を参考に、シミュレーション上では 1 エージェントのみ乗車可能とした。

4-2.3 ダイアグラムの作成

4-2.1 交通網の作成節で作成したテーブルと株式会社駅探提供のデータ（以下、駅探データとする）の駅名を突合させて表記ゆれを修正したのちに、データを結合させた。終点・起点フラグを用いて、終点・起点間を走る普通列車を作成した。

この普通列車だけでは、乗り入れや各種優等列車が存在する路線ではエージェントの動きを再現するためには不十分なため、大阪中心部の路線においては鉄道各社の公開している時刻表、運行情報から優等列車を設定した。

4-2.4 エージェントの移動シナリオの作成

MATSim に入力する plan ファイルは平常時の交通の動きを再現するための

① 通常時の大阪都市圏の移動需要

に加えて万博時に発生する移動需要を再現する

② 新幹線需要

③ 地域住民

④ 宿泊客

の 4 つに大別して作成した。

通常時の移動需要は、国土交通省が 5 年に一度行う都市圏内の都市内旅客流動調査である大都市交通センサスの鉄道調査データから作成した。首都圏、中京圏、近畿圏の三大都市圏における大量公共交通機関の利用実態の把握を目的としたデータであり、今回は万博開催時の 2025 年には現在の新型コロナウイルスによる移動の自粛・制限はほぼ緩和されているという仮定の下に、平成 27 年に実施された調査を用いた。簡単のために、図 9 に示すようにトリップごとにエージェントを作成した。センサスで捕捉された人の移動計画では拡大率（トリップがセンサス調査地域の人間の何人分を代表するのかわを示す値）が設定されているので、その拡大率に縮尺を乗じてエージェントを生成した。

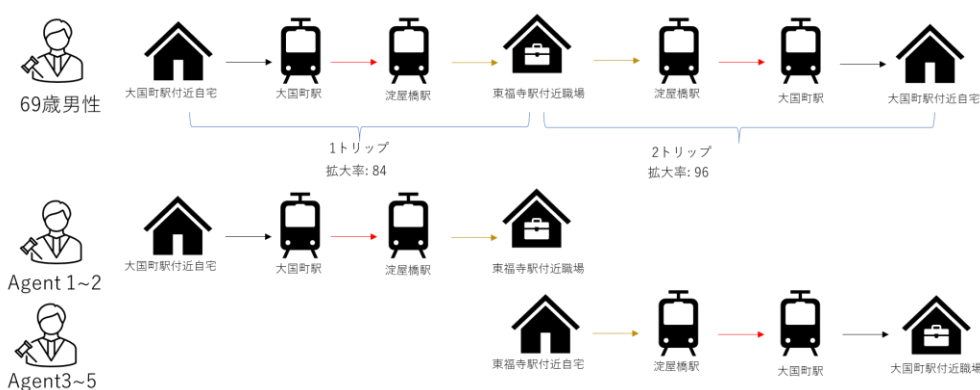


図 9 大都市交通センサスのトリップ分解法

万博に来場するエージェントは発生地から夢洲に向かい、数時間滞在したのちに夢洲からその目的地に帰るトリップチェーンとして移動計画を与えた。滞在時間は平均して愛知万博のものとほぼ同じになるように、図 5 を参考に作成した下表 6 の分布に従ってエージェントの滞在時間を設定した。

表 6

滞在時間	確率変数 (時間)	4	5	6	7	8	9	10	合計
確率分布		0.117503	0.195838	0.20563	0.151775	0.130967	0.111383	0.086903	1
期待値		0.470012	0.979192	1.233782	1.062424	1.047736	1.002448	0.869033	6.664627

②新幹線による来場者は 2 章で詳細を述べた通りに需要を発生させた。地元からの来場者は国土交通省の 500m メッシュ別将来推計人口の 2025 年データを用いて、今回の MATSim のシミュレーションの対象範囲内の各駅から半径 1500m 以内から万博の来場者を比例させて発生させた。③宿泊者も同様に、国土数値情報宿泊容量メッシュデータ[19]を用いて、夢洲から 15km 範囲内にある宿泊施設の収容人数と発生需要を比例させた。最終的に発生させたエージェントの総数は下表 7 に示す。④地元の来場者も同様に、国土数値情報の 500m メッシュ人口データ[20]を用いて夢洲から 25km にある範囲内駅の 1500m 半径にあるメッシュの人口と発生需要を比例させた。

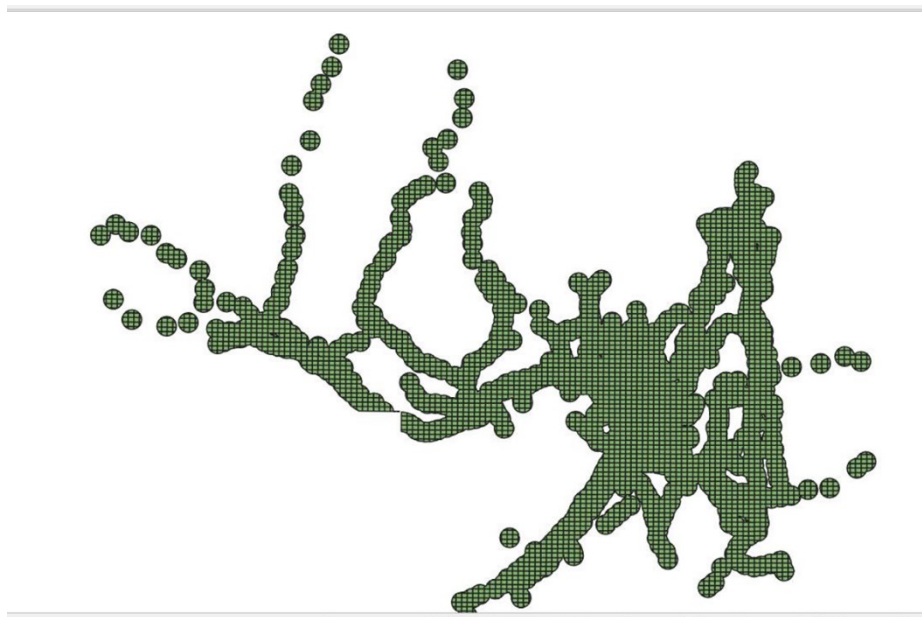


図 10 地元来場者の発生

表 7 各属性から作成したエージェントの数

ファイル種類	Plan1(自動改札)	Plan2(定期)	センサス合計	前泊者	新幹線	地元	万博合計	総数
Agent数	109,591	49,645	184,615	310	1,440	2,223	3,973	188,588
実数換算	4,383,640	1,978,600	6,362,240	12,400	57,600	88,920	158,920	6,521,160

5章 性能評価 現況・万博時シミュレーションの結果

本章ではセンサスから生成したエージェントのみを含むファイル（以下通常シナリオとする）と、センサスに加えて2.3節で想定した万博による追加需要のエージェントを加えたファイル（以下、万博シナリオと略する）の計算結果について述べる。

6.1節で作ったシナリオがどの程度機能しているのかを確認した。さらに6.2節と6.3節で万博交通が既存交通にいかの影響を与えたのかを考察し、6.4節で特に対策をすべき駅を絞り込んだ。

5-1. シミュレーションのシナリオの精度の確認

MATSimのシミュレーション上では、入力planデータとして付与されているトリップチェーンの動きをシミュレーション時間内で終了できないエージェントは“stuckAndAbort”という状態として処理される。まず初めに、両シナリオ上での移動不可になったエージェントの数を下表にまとめた。

下表でセンサスから生成したエージェントで動けなくなったものが存在する理由は、端駅から端駅で自動生成した路線で十分な量の電車が走っていないために本来なら乗れたはずの電車に乗れなかったり、時間内に行動が終わらなかったりするものが存在するためである。また、この数が万博シナリオにおいて増加した原因は、地元来場者によってそのような路線への乗車率が高まり、より積み残しが発生するようになったためと考えられる。

鉄道の輸送可能人数が需要に対して過少であったり、走っていない路線が存在したりすることで移動不可能エージェントが発生する。シナリオ・万博シナリオ両者に共通して当初予定した計画をシミュレーション時間内に終えることができなかったエージェントの割合は全エージェント数の2.5%程度に収まっており、鉄道を動かすことができていることが確認できた。路線別では、阪急神戸線阪急神戸線、JR関西本線、京阪本線での発生が主たる原因である。これらの路線で、駅探データと各社の時刻表から作成した普通列車の本数が不足し、普通列車のみ止まる駅を利用するエージェントが移動不可能になってしまったためであると考えられる。

表 8 移動不可能なエージェント数の変化

	通常シナリオ	万博シナリオ
センサス	546	570
前泊者	-	0
新幹線	-	0
地元	-	40
合計	546	610

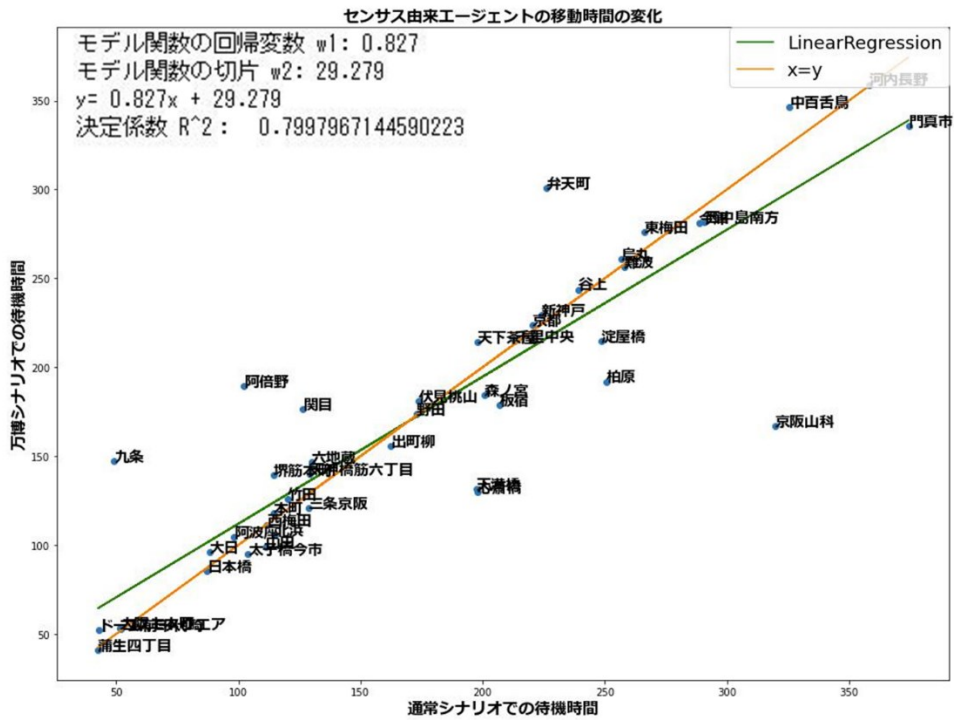


図 12 通常時の大阪都市圏の移動需要由来エージェントの待機時間変化の二次元プロット (待機時間 400 秒以下を拡大したもの)

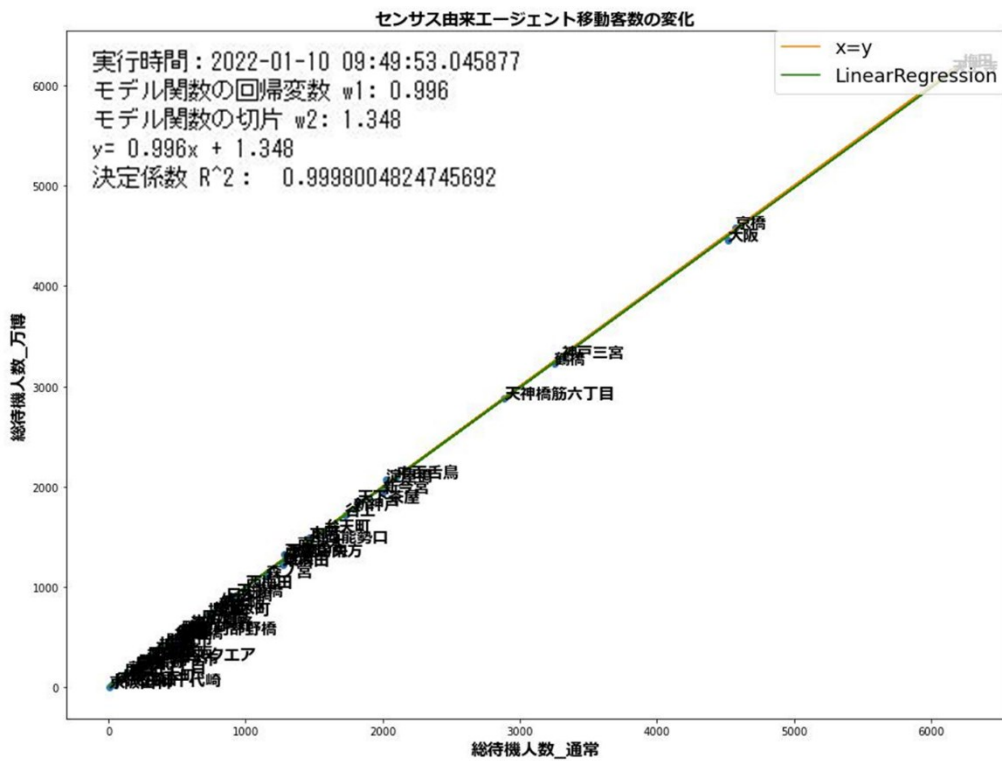


図 13 通常時の大阪都市圏の移動需要由来エージェントの利用人数変化の二次元プロット

表 11 通常時の大阪都市圏の移動需要由来エージェントの待機人数が3%以上上昇した駅

駅名	総待機時間_万博	総待機人数_万博	一人当たり待機時間_万博	総待機時間_通常	総待機人数_通常	一人当たり待機時間_通常	待機人数増加率
柏原	94772	470	201.642553	111337	451	246.866962	1.042129
京阪山科	1627	12	135.583333	2301	11	209.181818	1.090909
蒲生四丁目	11473	224	51.21875	9084	204	44.529412	1.098039

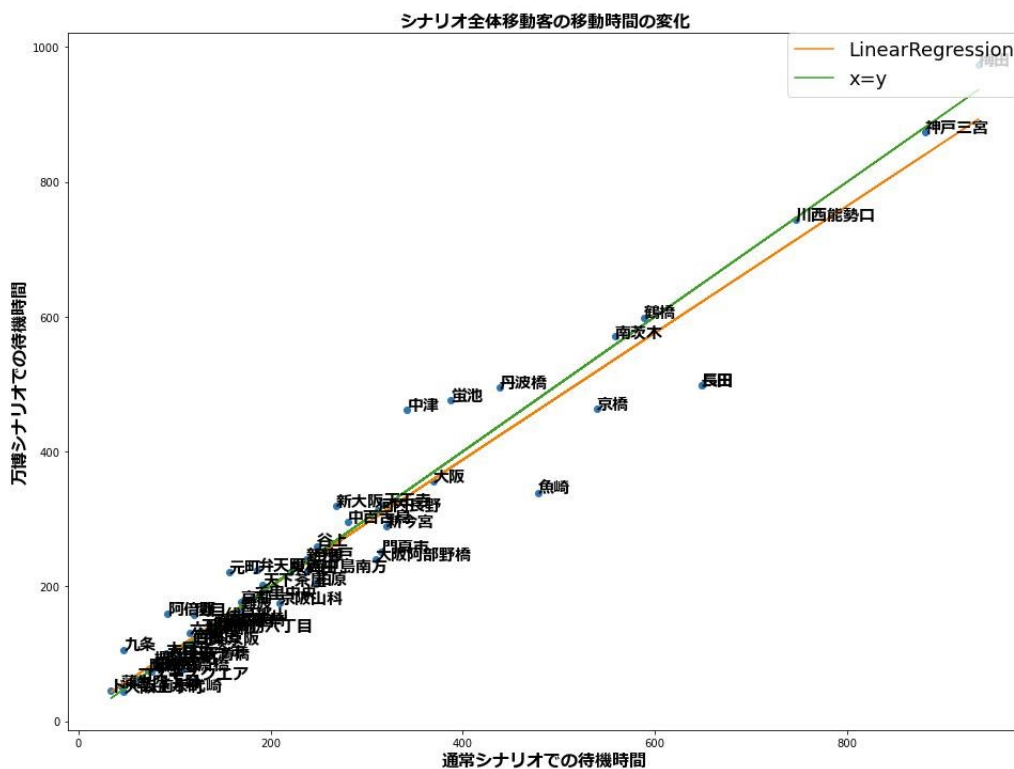


図 14 シナリオ全体でのエージェントの移動時間の変化

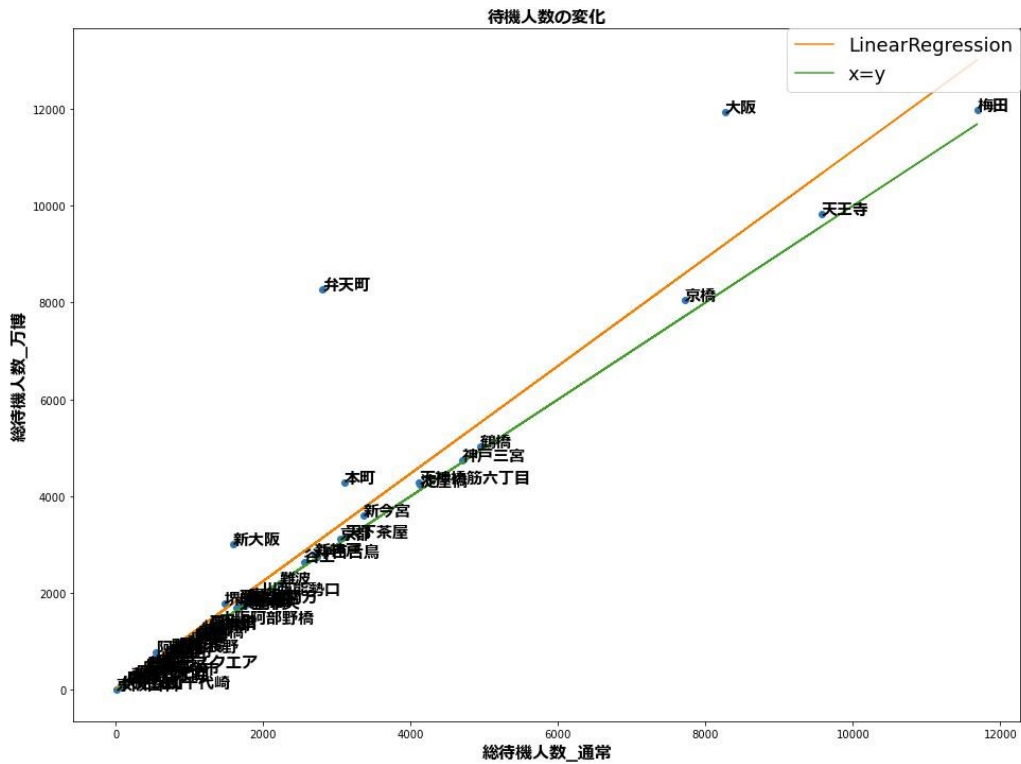


図 15 シナリオ全体での利用エージェント数の変化

表 12 万博来場エージェントが使用した駅と各駅での待機時間
(ただし、200 エージェント以上の利用駅に限る)

	弁天町	夢洲	大阪	新大阪	本町	梅田	新今宮	京橋	堺筋本町
利用エージェント数 (体)	5486	3936	3745	1455	1160	345	312	310	294
待機時間 (秒)	1192493	235948	1299890	480605	72477	67247	58571	49836	15549
一体あたり待機時間	217.3702	59.94614	347.1001	330.3127	62.48017	194.9188	187.7276	160.7613	52.88776

5-3. 大阪メトロ中央線・御堂筋線の混雑率の検証

各車両エージェントの乗り込んだエージェントの総数を調べることで、通勤ラッシュ時の万博来場者による御堂筋線・中央線の客数の変化を調べた。下図から通常シナリオによって朝の通勤ラッシュ・通学ラッシュが再現できていることが確認できた。一方で万博の入場ラッシュが想定していた8~9時に必ずしも起こらず、やや遅れた時間帯に発生している。



図 16 大阪メトロ中央線の混雑率ヒートマップ (左:通常シナリオ 右:万博シナリオ)

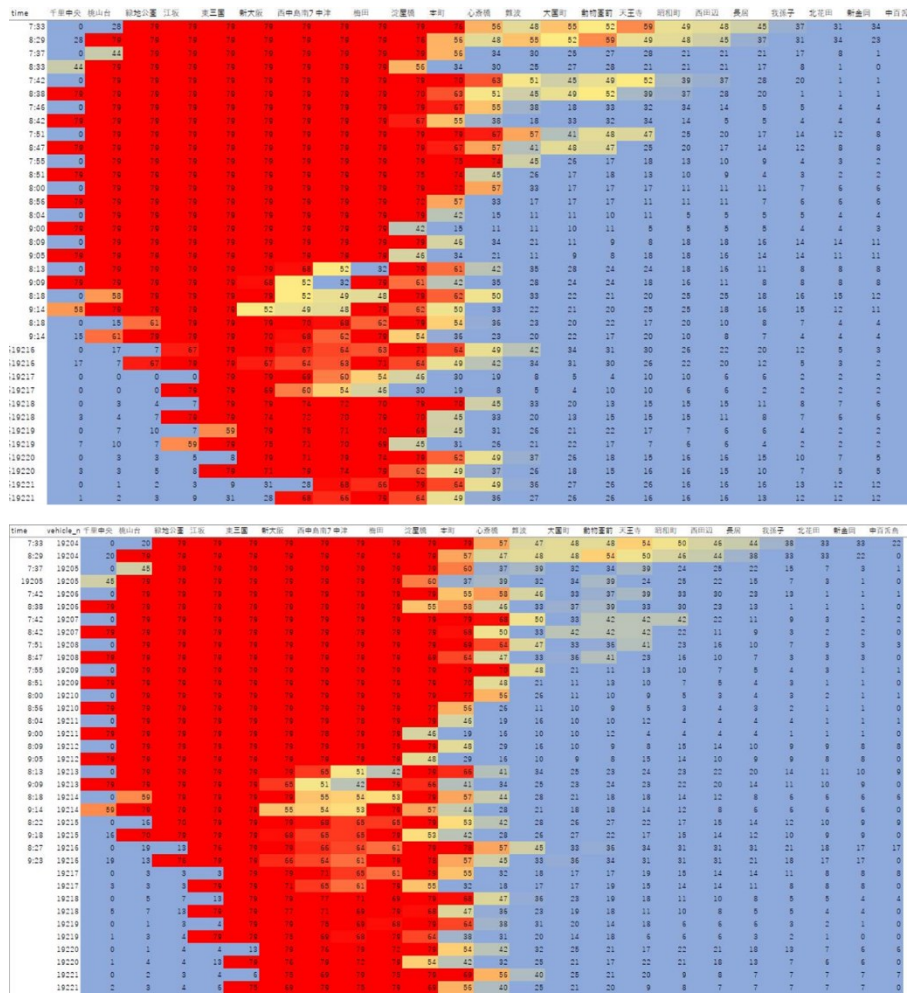


図 17 大阪メトロ御堂筋線の混雑率ヒートマップ (上:万博シナリオ 右:通常シナリオ)

5-4. シナリオ間で大きな変化が起きた駅の絞り込み

下表 13 は、万博シナリオで待機時間もしくは待機人数が 10%以上増加した駅をとり上

げたものである。千里中央駅は千里ニュータウンの中心駅であり、地元からの来場者の発生により利用者が増加したと考えられる。その他上位の駅の中では弁天町、本町、堺筋本町など大阪メトロ中央線の駅が目立ち、特に JR 線との乗り換え需要がある弁天町駅、御堂筋線との乗り換えが行われる本町での需要増加が顕著であった。これは新大阪で発生した来場者が図 18 に示すような①新大阪-本町-夢洲②新大阪-弁天町-夢洲 といった乗り換えを行ったためである。図 19 はピーク時におけるこの 2 経路の所要時間を、具体例を用いて比較したものである。大阪メトロを用いて本町を経由して夢洲に向かう場合 47 分、JR 線を用いて弁天町へ向かう場合 32 分必要であり、本研究ではエージェントの選択モデルに料金項が含まれていないためより弁天町が選ばれやすい状態になっている。

それ以外の路線では JR と各私鉄が集まって京都、兵庫との交通の要である大阪-梅田と需要の発生地として新大阪駅の利用者が顕著に増えていることが確認された。

表 13 待機時間もしくは待機人数が 10%以上増加した駅

駅名	総待機時間_万博	総待機人数_万博	一人当たり待機時間_万博	総待機時間_通常	総待機人数_通常	一人当たり待機時間_通常	乗客数比率	待機時間比率
1 弁天町	1857191	8267	224.651143	523087	2807	186.350908	2.945137	1.205527
3 新大阪	959272	3009	318.800931	426890	1591	268.315525	1.891263	1.188157
61 大阪	4237705	11938	354.976127	3052985	8265	369.387175	1.444404	0.960987
42 阿波座	58745	779	75.410783	39603	549	72.136612	1.418944	1.045388
60 本町	316239	4287	73.766970	237078	3109	76.255388	1.378900	0.967367
23 京阪山科	2455	14	175.357143	2301	11	209.181818	1.272727	0.838300
41 堺筋本町	155581	1790	86.916760	116643	1477	78.972918	1.211916	1.100589
55 蒲生四丁目	11617	228	50.951754	9084	204	44.529412	1.117647	1.144227
45 中津	173584	376	461.659574	124528	364	342.109890	1.032967	1.349448
44 九条	20707	195	106.189744	8970	189	47.460317	1.031746	2.237443
20 六地蔵	54086	414	130.642512	46612	403	115.662531	1.027295	1.129515
53 元町	173831	788	220.597716	121235	773	156.836999	1.019405	1.406541
51 六日	55332	549	100.786885	49211	540	91.131481	1.016667	1.105950
47 阿倍野	44122	276	159.862319	25241	273	92.457875	1.010989	1.729029
21 丹波橋	415041	839	494.685340	366189	836	438.025120	1.003589	1.129354
12 箕池	521106	1093	476.766697	424992	1097	387.412944	0.996354	1.230642
16 醍目	22966	146	157.301370	17647	147	120.047619	0.993197	1.310325
43 ドーム前千代崎	2250	50	45.000000	1762	52	33.884615	0.961538	1.328036

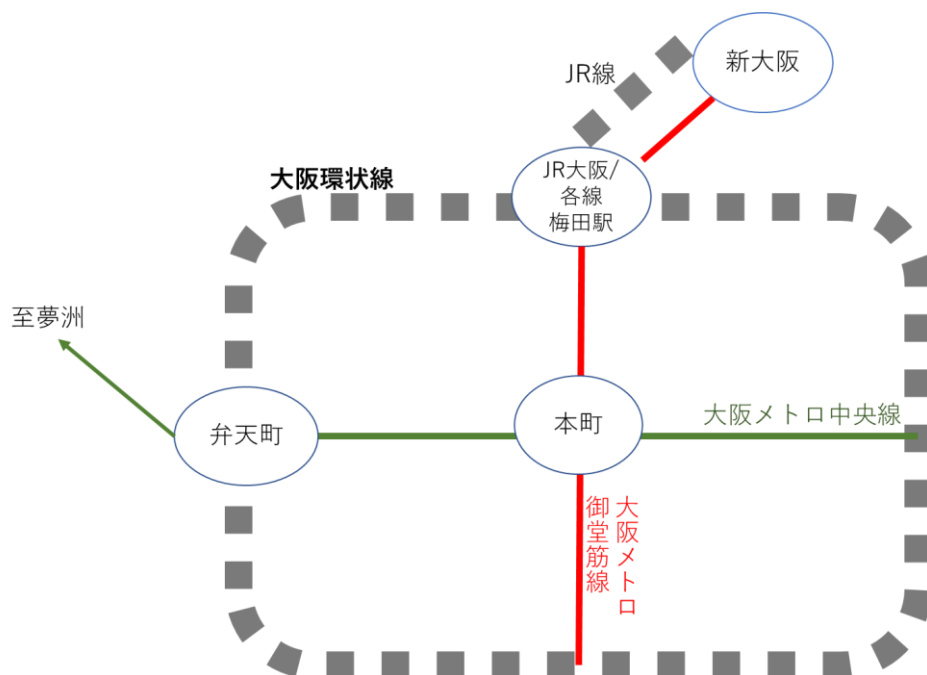


図 18 新大阪から夢洲に至る経路

本町経由(agent id : 195797)

8:17 来阪 (JR新大阪駅)
 8:26 御堂筋線新大阪到着
 8:28 乗車
 8:38 本町駅到着
 8:44 中央線に乗り換え
 8:47 乗車
 9:04 夢洲到着

弁天町経由(agent id : 195798)

8:30 来阪 (JR新大阪駅)
 8:30 JR線新大阪到着
 8:48 乗車
 8:52 JR大阪駅到着
 8:54 環状線に乗り換え
 8:54 乗車
 9:02 夢洲到着

図 19JR 経路と大阪メトロ経路の比較

万博シナリオでは中央線全体で待機時間の増加がみられた。待機人数に大きな変化が見られた駅の中でも特にその中でも JR 線との乗り換え需要がある弁天町駅、御堂筋線との乗り換えが行われる本町での需要増加が顕著であった。加えて大阪-梅田と需要の発生地として新大阪駅の利用者が顕著に増えていることが確認された。

6章 提案 万博開催時における効率的なシャトルバス運用方法

6-1. バスの運用方法最適化問題の定式化

6章までで検討した万博時に発生する移動需要を緩和するための手段として、夢洲と特定の駅の間でシャトルバスをピストン輸送させることで、鉄道の需要を緩和することが考えられる。しかし、2-4節で見たようにここで必要なシャトルバス台数は単純に人数のみを考慮に入れて考えても330台以上と、大阪観光バスの登録台数[1]1,286台に対して大きな数字である。そのため、バスの台数をなるべく小さくしたうえで最大限人を運べるような運び方を考えてみたい。バスを走らせる駅としては、需要が発生する新大阪駅、結節点としての役割が大きい大阪駅、需要が大きく増加する見込みである弁天町、JRに需要を振り替える桜島駅を候補地とする。

この節ではバスの運行を考えるうえでの必要な要件を定式化する。下表のように必要な数字を定義すると、

表 14 最適化問題に用いる値

会場のバース容量	C
駅のバース容量	c_i
一時間に駅に向けて発射するバスの本数	X_i
バスの定員	α
駅までバスの所要時間(往復)	T_i
必要なバスの台数	m_i
会場から出てくる潜在需要	Z
駅への潜在需要	z_i
実際に乗った数	Y
駅 i にむけて実際に乗った数	y_i

「バスの台数をなるべく小さくしたうえで最大限人を運べるような運び方」問題の目的関数は下記のように表せる。

目的関数

$$\max Y = \alpha \sum x_i \quad s.t. \quad \min M = \sum T_i x_i$$

さらに制約式は以下の(1)~(5)のように決まる。

まず、各駅から到着するバスは万博会場内のバース内容量以下である必要から、

$$\sum x_i \leq C \quad (1)$$

また、各駅の発車できるバスの台数はバース容量以下であるため

$$x_i \leq c_i \quad (2)$$

バスに乗る乗客は潜在需要を超えることはないので

$$\alpha x_i \leq z_i \quad (3)$$

バスに乗る人は、出発するバスのほとんどが定員が埋まると考えて

$$y_i = \alpha x_i \quad (4)$$

各駅間で走らせるのに必要なバスの台数は

$$M = \sum T_i \times x_i \quad (5)$$

6-2. シャトルバス運用方法

さて、今回の万博においては各数値の設定は下表のようになる。各駅への潜在需要については①桜島の潜在需要は、

表 1 に示した現行計画の鉄道輸送と本研究の想定する可能輸送人数の差である 8000 人として、ピーク時の需要は 5.9/28.5 をかけることで算出した。(28.5 万人が来場する日の一時間来場者は 5.9 万人であることから算出した。) ②大阪駅の需要は 6 章で作成した MATSim の中で地元・宿泊からの来場者の中で大阪駅から夢洲に向かったエージェントの数から推定した。③弁天町駅の潜在需要は②と同様に、弁天町駅を利用して夢洲に来たエージェントから②を差し引いて推定した。(大阪駅からの来場者は弁天町駅を利用してくることが想定されるため) ④新大阪駅の需要は表 3 の値から推定した。会場・各駅のバース容量はバスの発車可能間隔を m_1 分、バース数を n_1 として

$$\frac{60}{m_1} \times n_1$$

でありバスの発車可能間隔を 6 分、として会場と各駅のバス停留場の数をそれぞれ表 15 のように仮定した。

表 15 最適化に用いた値

	会場	桜島	弁天町	大阪	新大阪
会場のバス容量(台/時) C	120				
各駅のバス停数		6	4	5	7
駅のバス容量(台/時) c_i		36	24	30	42
-時間に駅に向けて発射するバスの本数(台/時) X_i					
バスの定員(人/台) α	50				
駅までバスの往復所要時間(分) T_i		28	40	50	74
必要なバスの台数(台) m_i					
会場から出てくる潜在需要(人) Z					
駅への潜在需要(人) z_i		1656	3064	3225	5962
実際に乗った数(人) Y					
駅 <i>i</i> にむけて実際に乗った数(人) y_i					

この値を用いると、 $c_2 \ll \frac{z_2}{\alpha}, c_3 \ll \frac{z_3}{\alpha}, c_4 \ll \frac{z_4}{\alpha}$ であり、 $(C - c_2 - c_3 - c_4) * \alpha < z_1$ であるためバスをすべて使い切ることが想定される。そのため今回は付録で記述する解法のうち

①バスをすべて使い切る場合に該当し、この問題を解くと

$$(x_1, x_2, x_3, x_4) = (33, 28, 30, 29)$$

が導かれた。

7章 実験結果と議論 シャトルバスの運用効果の測定

本章では6章で扱った万博シナリオと比較しながら、ダイヤグラムファイルに7章で考察したシャトルバス運行本数(を午前9時から午後9時の間夢洲と各駅間を走るように実装したファイル(以下、シャトルバスシナリオと記す)のシミュレーションの再現結果について述べる。

7-1節で移動不可能になったエージェントに関して検証し、7-2節で移動時間の変化に対して全体の傾向を述べ、シャトルバスの運行の効果について考察をする。

7-1. 移動不可能エージェントの検証

シャトルバスシナリオでは、通常時の大阪都市圏の移動需要由来のエージェントの移動不可能数は減少したが、夢洲に向かうエージェントの移動不可能数は大幅に増加した。これは表17にも示すように、多くの万博エージェントがシャトルバスの利用に切り替えたことで、通常時の大阪都市圏の移動需要にかかる負担が減少したことが要因であると考えられる。一方で表17に示すように、シャトルバスの台数が十分でない(特に夢洲-大阪間)ことによってシャトルバスを待機したまま、もしくは本来の滞在時間との兼ね合いで帰宅ができなくなりシミュレーション時間の終了を迎えてしまったエージェントが発生していることが確認された。

表16 移動不可能なエージェント数の変化
(万博シナリオとシャトルバスシナリオの比較)

	万博シナリオ	シャトルバス:
センサス	570	456
前泊者	0	55
新幹線	0	270
地元	40	464
合計	610	1245

表17 移動不可能なエージェント数(路線別・シャトルバスシナリオ)

シャトルバス	大阪メトロ中	阪急神戸	JR関西本線	阪急宝塚
大阪	中央線	線		線
415	175	157	114	110

7-2. 通常時の大阪都市圏の移動需要の移動時間の検証

図20 図21は通常時の大阪都市圏の移動需要由来のエージェントを分析したものである。シャトルバスを導入したことで、駅での待機時間はやや増加したものの、一部の駅では待機時間が減少したことが分かった。この結果によってシャトルバスの運行を適切に行うことによってイベントの外部性を軽減できる可能性が示された。

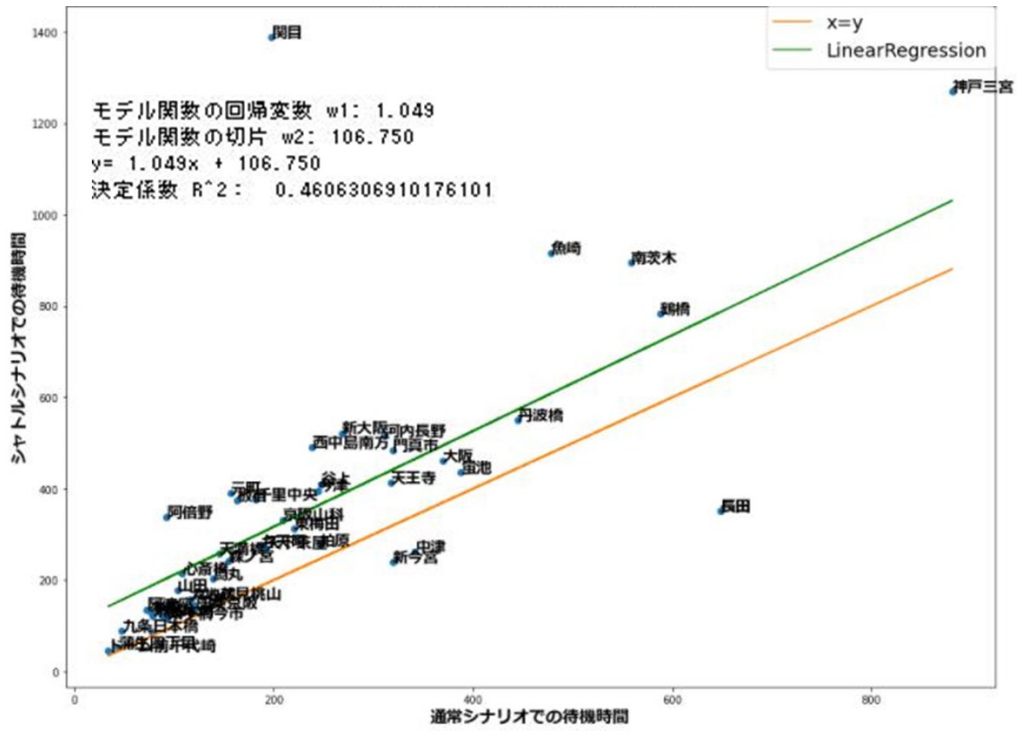


図 20 通常時の大阪都市圏の移動需要エージェントの待機時間の変化の二次元プロット (通常シナリオとシャトルバスシナリオの比較)

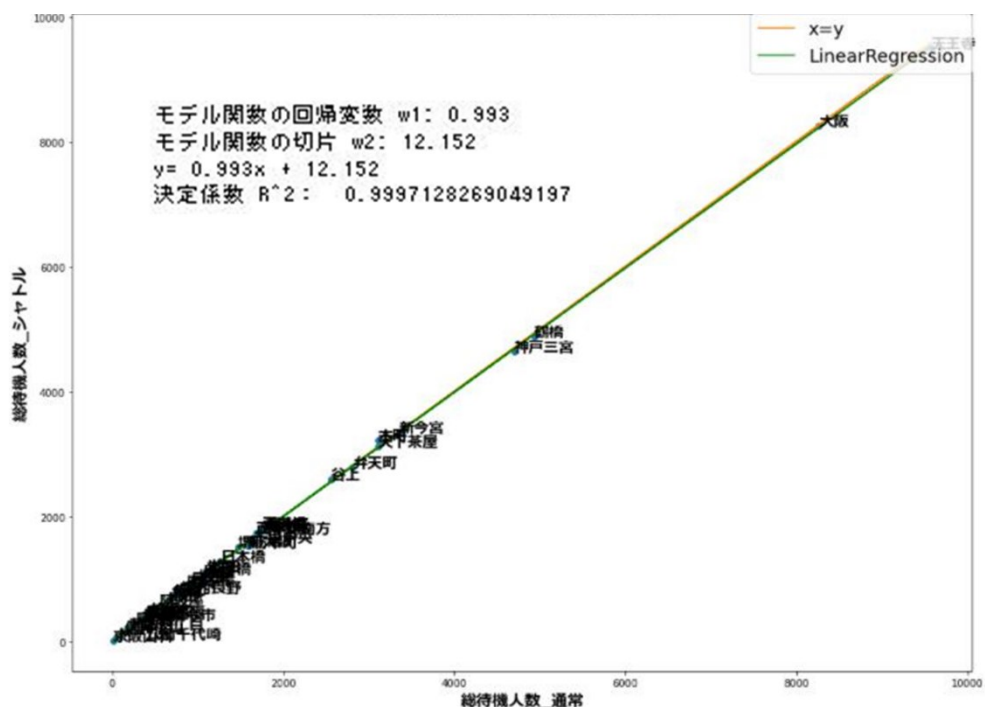


図 21 通常時の大阪都市圏の移動需要由来エージェントの待機時間変化の二次元プロット (万博シナリオとシャトルバスシナリオの比較)

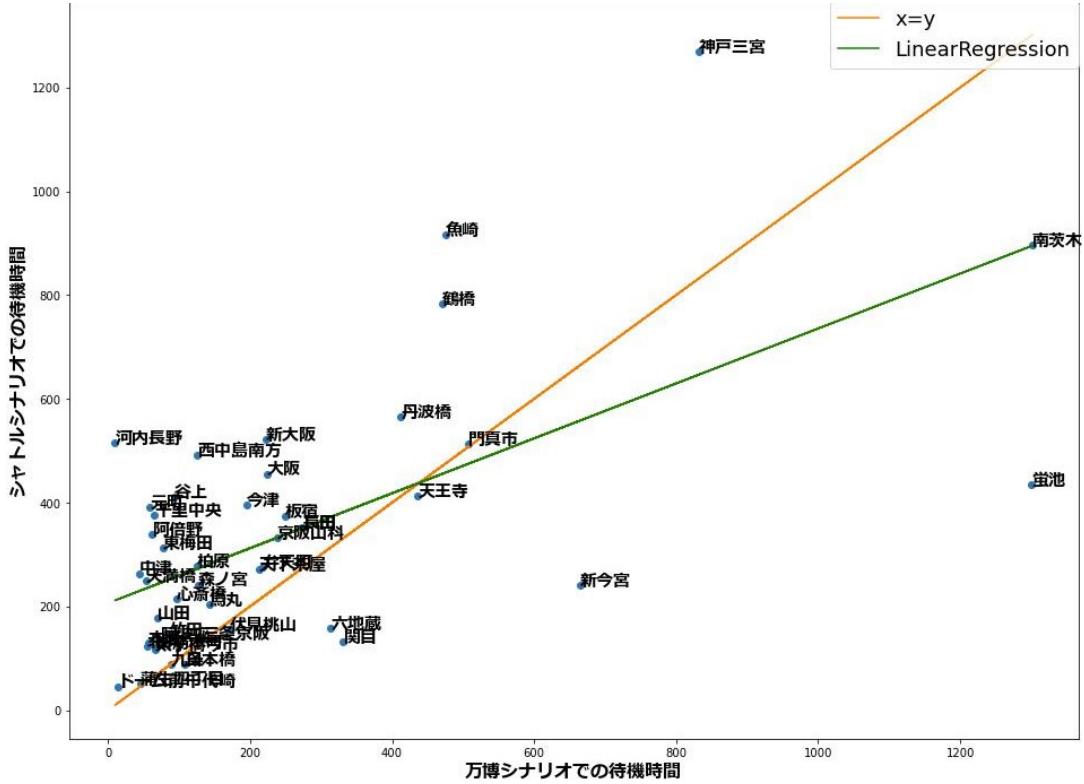


図 22 通常時の大阪都市圏の移動需要由来エージェントの利用数の変化の二次元プロット
(通常シナリオとシャトルバスシナリオの比較)

7-3. シャトルバスの運行方法に対する考察

新大阪・大阪シャトルバスの利用者は十分なものの桜島・弁天町の間を往復するバスは 10 エージェント以下の利用にとどまり、ほとんど利用されていない (表 18)。これは、桜島を 通って迂回するルート、弁天町で乗り換えを行うルートは鉄道に乗るのに比べて所要時間 が多くかかってしまい、選択されなかったためであると考えられる。

より効率的にエージェントをシャトルバスで輸送するためには、①新大阪と大阪からの シャトルバスの台数を増やす②弁天町や桜島を利用することにインセンティブを設ける施 策が考えられる。

表 18 各駅発から夢洲に向かうバスの利用エージェント数

桜島	新大阪	大阪	弁天町
10	753	725	0

7-4. 万博開催時交通の需要と供給計画への貢献

本研究では、輸送経路が制限される会場で行われる万博の輸送計画の実現可能性と既存 の交通利用客に対する外部性の検討並びにそれに対する緩和策の検討を議論した。5~6 章

で行った関西圏の交通網と万博時シナリオの再現によって、万博で発生する需要により一部の乗換駅・御堂筋線・中央線で利用客の待機時間の増加が起こる可能性が示された。

7章では、バスの設計によって弁天町-夢洲・桜島-夢洲間のバスは利用がなされなかったものの、混雑駅に対してシャトルバスの運用を適切に行うことによって待機時間の上昇や通勤通学の移動客の経路変更を防ぐ可能性が示された。一方で、エージェントの選択モデルには料金項目が設定されていないため、本研究の実験全体として他社線間の乗り換えや料金の高い路線が現実よりも高く評価されている可能性がある。加えて、他の混雑緩和手段（滞留点を設置する。早期退場を促す仕組みを作る）ことに関してはまだ検討されていない。

8章 結論

8-1. 研究の目的と発見事項のまとめ

本研究では 2025 年開催予定の万博の交通に対して、その影響を緩和するための施策を提案し、効果の検証を行うことを目的とした。そのために、大阪万博において公表されている輸送計画の数値を会場の持つ地理的特性を含めて再度検討した。次に、株式会社駅探提供のデータと各機関の公表するデータを加工し、アクティビティベースシミュレータ MATSim を利用するために必要な形に整形した。最後に、シミュレーションの結果を踏まえて最適なバスの運行方法を提案し、その効果の検証をさらに MATSim を用いて行った。本論文での実験および考察において得られた知見を以下に示す。

- 大阪万博においては、乗換駅である弁天町や本町、そのほか中央線沿線の駅で待機時間の増加、通勤通学者のルート変更が起こる可能性がある。
- シャトルバスの適切な運用によって万博の持つ関西圏の交通網への負の外部性を軽減しうる。
- 需要の大規模発生地への直接の運行は効果的であるが、乗り換えによって混雑が生じる駅や迂回ルートの時間短縮を図る駅は効果的でない可能性があり、適切なインセンティブの設計が必要である。

8-2. 本研究の限界と今後の展望

本研究にはいくつか限界点がある。

- 一部路線においては列車の運行本数が現実の本数よりも少なくなってしまう、そのために移動困難になっているエージェントが存在する。
- エージェントの効用関数の中に所要時間の項目しかないため、運用会社が異なる路線への乗り換えで生じる料金や乗り換え回数が無視されている。また、データの加工において、結節点の駅を一つのノードにまとめてしまったため、乗り換えにかかる時間が見積もられている可能性がある。また、これによって乗換駅への輸送シャトルバスの効果が過小評価されている可能性がある。
- 計算量を減らすためにエージェントの数を 1/40 に圧縮しているが、それにより需要の少ない交通への影響が考慮されていない可能性がある。
- 入場時・出場時の交通集中を回避するようにエージェントが行動している。
- シャトルバス運行以外の需要緩和策が十分に議論されていないこと

これらを踏まえて今後の研究では、

- このような大都市圏でのエージェントベースシミュレーションで、選択モデルの中に料金項を入れ適切に料金設定を組み込むこと。
- 乗換駅へのシャトルバスの乗車にインセンティブを付けたうえでのシミュレーション。

に取り組むことを考えたい。

謝辞

本論文は筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻准教授の日下部貴彦先生からは、文献の紹介をいただき、本研究の遂行にあたって多大なご指導を頂いた。ここに深謝の意を表す。副指導の同専攻准教授の小林博樹先生には副査としてご助言をいただくとともに本論文の細部にわたりご指導いただいた。ここに深謝の意を表す。本研究の 6 章の実験では株式会社 駅探からから研究に必要なデータの提供をいただいた。ここに感謝の意を表す。最後に、本研究並びに学業全般にわたって経済的・心身的に支援して下さる家族に謝意を表す。

参考資料

- [1] 経済産業省, “2025年国際博覧会検討会の 会場計画等の検証,” 2017. [Online]. Available: https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoryu/hakurankai/pdf/002_07_00.pdf.
- [2] 坂井勝哉 and 日下部貴彦, “観光施設での時間帯別効用を考慮した 出発時刻選択均衡モデル,” 土木計画学研究発表会・講演集, vol. 第 57 回, pp. 1–6, 2018.
- [3] 国土交通省, “三大都市圏の最混雑区間における平均混雑率・輸送力・輸送人員の推移,” 2002. https://www.mlit.go.jp/tetudo/toshitetu/03_04.html (accessed Jan. 12, 2022).
- [4] 久保田尚, 大口敬, and 高橋勝美, 読んで学ぶ 交通工学・交通計画. 理工図書, 2010.
- [5] 内閣官房国際博覧会推進本部, “2025年に開催される日本国際博覧会（大阪・関西万博）に関連するインフラ整備計画の概要,” 2021. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/expo_suisin_honbu/kaigi/dai2/ketsugi/setsumei_jikou2.pdf (accessed Jan. 15, 2022).
- [6] 大阪市高速電気軌道株式会社, “Osaka Metro各路線の混雑状況について,” 2021. https://subway.osakametro.co.jp/news/news/other/om_konzatsujyoukyou.php (accessed Jan. 12, 2022).
- [7] 経済産業省, “大阪万博登録申請書,” 2019.
- [8] “愛・地球博閉幕後データ集.” http://www.expo2005.or.jp/jp/jpn/data/data_a.html (accessed Dec. 12, 2022).
- [9] 西井和夫, 佐々木邦明, 江守昌弘, 横山憲, and 斎藤圭亮, “エリア・マネジメントとしてのイベント対応 TDM 施策 —鈴鹿 F1 開催時 TDM を例として—,” 2000.
- [10] H. Makino, “2020年東京オリンピック・パラリンピックと 交通需要マネジメント,” pp. 29–37, 2020.
- [11] T. D. Management, “東京 2020 大会に向けた取組 —,” 2020.
- [12] Y. Kitakami, T. Mori, and F. Sakahira, “都市課題の改善に向けた マルチエージェント・シミュレーションの活用 The Application of Multi-Agent Simulation to Improve Urban Problems,” vol. 133, no. 9, pp. 1640–1644, 2013, doi: 10.1541/ieejjeiss.133.1640.
- [13] 佐々木邦明, 菊池輝, 布施孝志, 福田大輔, and 藤井涼, “道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果 報告 レポート,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h27/pdf/report27-2.pdf>.
- [14] M. Balmer and M. Rieser, “Agent-based simulation of travel demand : Structure and computational performance of MATSim-T Agent-based simulation of travel demand : Structure and computational performance of MATSim-T,” no. May 2014, 2008.
- [15] A. Horni, K. Nagel, and K. W. Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulation Title of Book : The Multi-Agent Transport Simulation MATSim Subtitle positioned below. .*
- [16] M. Simulation, P. T. Survey, and B. Data, “アクティビティベースシミュレータ

MATSIM の東京都市圏への適用,” pp. 7–10.

- [17] 国土交通省, “国土交通省国土数値情報鉄道時系列データ.”
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N05-v1_3.html (accessed Jan. 12, 2022).
- [18] 近畿車輛株式会社, “近畿車両 車両紹介.”
https://www.kinkisharyo.co.jp/ourproducts/?cat=1#product_list (accessed Jan. 22, 2022).
- [19] 国土交通省, “国土交通省国土数値情報宿泊容量メッシュデータ.”
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-P09.html> (accessed Jan. 13, 2022).
- [20] 国土交通省, “国土交通省国土数値情報500mメッシュ別将来推計人口データ (H30国政局推計) .” <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh500h30.html>
(accessed Jan. 13, 2022).

付録

最適化問題の解法

(2),(3)より $x_i \leq \frac{z_i}{\alpha}$ または $x_i \leq c_i$ が有効になるため、 $\gamma_i = \min\left(\frac{z_i}{\alpha}, c_i\right)$ とすると

$$x_i \leq \gamma_i \quad (6)$$

制約条件をラグランジュ緩和して

$$\min L_{|Y^*} = \sum T_i x_i - \lambda_C (C - \sum x_i) - \sum \lambda_i (\gamma_i - x_i) - \lambda^* (Y^* - \alpha \sum x_i)$$

$$\frac{\delta L}{\delta x_i} = T_i - \lambda_C - \lambda_i - \lambda^* \alpha x_i = 0 \quad \text{for } \forall i$$

$$Y^* - \alpha \sum x_i = 0$$

$$\lambda_C (C - \sum x_i) = 0$$

$$\lambda_i (\lambda_i - x_i) = 0 \quad \text{for } \forall i$$

となる。ここで、 $Y^* = \alpha \sum x_i$ であるから $\sum x_i = \frac{Y^*}{\alpha}$

①バースを使い切る すなわち $C - \sum x_i = 0$ の時、 $Y^* = \alpha \sum x_i = \alpha C$ となり、

$$\min M = \sum T_i x_i$$

$$\sum x_i = C$$

$$x_i \leq \gamma_i \quad \text{for } \forall i$$

をとけばよい。

②全体のバースを使えない すなわち $C - \sum x_i > 0$ のとき、 $\lambda_C = 0$ となり、

$$\max Y = \sum \alpha x_i$$

$$\lambda_i (\gamma_i - x_i) = 0 \quad \text{for } \forall i$$

$$\frac{\delta L}{\delta x_i} = T_i - \lambda_i - \lambda^* \alpha x_i = 0 \quad \text{for } \forall i$$

なので、ラグランジュ緩和により、

$$\max L = \sum \left(\alpha x_i + \mu_i \lambda_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) + \mu_i^* (T_i - \lambda_i - \lambda^* \alpha x_i) \right)$$

$$T_i - \lambda_i - \lambda^* \alpha x_i = 0$$

ただし、 λ_{c_i} 、 λ_{z_i} は非負、また

$$\lambda_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) = 0$$

$$\lambda_i = 0 \text{ or } \lambda_i = T_i - \gamma_i \lambda^*$$

②-1 $\lambda^* > 0$ (上位問題が有効需要を運びきる) を仮定すれば、
 なので、ラグランジュ緩和により、

$$\max L = \sum \left(\frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} + \mu_i \lambda_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) \right)$$

ただし、 λ_{c_i} 、 λ_{z_i} は非負、また

$$\lambda_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) = 0$$

$$\lambda_i = 0 \text{ or } \lambda_i = T_i - \gamma_i \lambda^*$$

$$\frac{\delta L}{\delta \lambda_i} = -\frac{1}{\lambda^*} + \mu_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) + \mu_i \lambda_i \left(\frac{1}{\lambda^*} \right) = 0$$

$$\lambda_i = 0 \text{ のとき } -\frac{1}{\lambda^*} + \mu_i \left(\gamma_i - \frac{T_i}{\lambda^*} \right) = 0 \quad \mu_i = \frac{1}{\lambda^* \left(\gamma_i - \frac{T_i}{\lambda^*} \right)}$$

$$\lambda_i = T_i - \gamma_i \lambda^* \text{ のとき } -\frac{1}{\lambda^*} - \mu_i \left(\gamma_i - \frac{T_i}{\lambda^*} \right) = 0 \quad \mu_i = -\frac{1}{\lambda^* \left(\gamma_i - \frac{T_i}{\lambda^*} \right)}$$

$$\frac{\delta L}{\delta \lambda^*} = -\sum \left(\frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} + \mu_i \lambda_i \left(\frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} \right) \right) = 0$$

$$\lambda_i = 0 \text{ のとき } \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} + \mu_i \lambda_i \left(\frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} \right) = \frac{T_i}{\lambda^{*2}}$$

$$\lambda_i = T_i - \gamma_i \lambda^* \text{ のとき } \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} + \mu_i \lambda_i \left(\frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^{*2}} \right) = 0$$

$\frac{T_i}{\lambda^{*2}}$ は、非負なのでつまり、 $\lambda_i = T_i - \gamma_i \lambda^*$ の関係になる。

つまり、 $x_i = \gamma_i$ となる

②-2 $\lambda^* = 0$ (上位問題が有効需要を運びきる) を仮定すれば、
 なので、ラグランジュ緩和により、

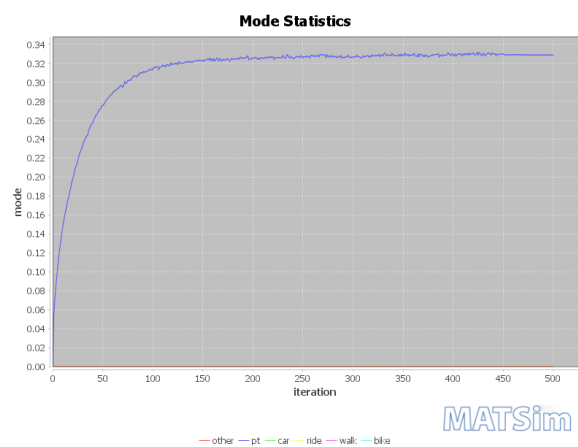
$$\max L = \sum \left(\alpha x_i + \mu_i \lambda_i \left(\gamma_i - \frac{T_i - \lambda_i}{\lambda^*} \right) + \mu_i^* (T_i - \lambda_i) \right)$$

$$T_i = \lambda_i$$

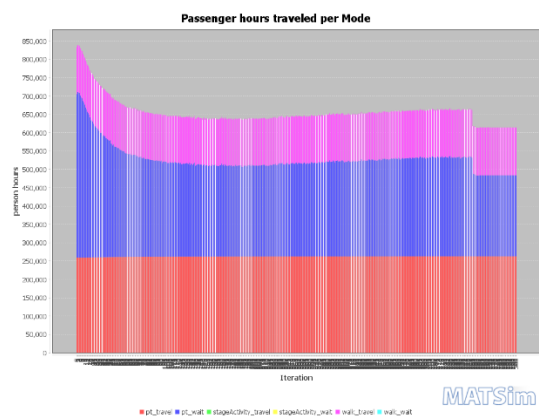
ただし、 λ_{c_i} 、 λ_{z_i} は非負、また

$T_i \gamma_i = 0$ を満たす必要が出てきて不適

シミュレーションの収束状況
通常シナリオ

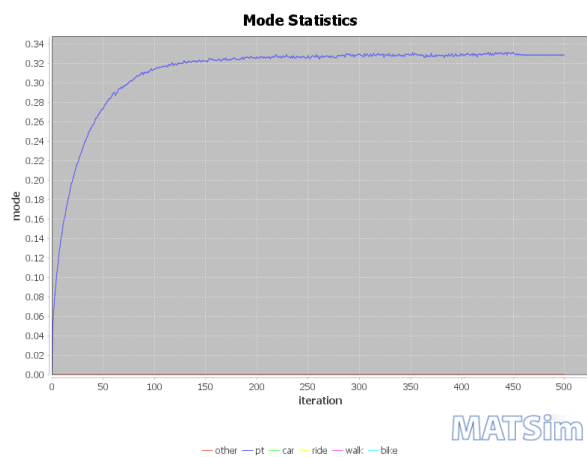


付録図 1 Mode Statistics(通常シナリオ)

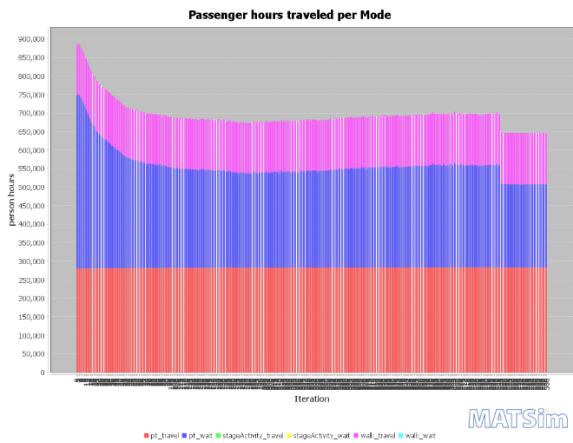


付録図 2 各モードに費やされた時間(万博シナリオ)

万博シナリオ

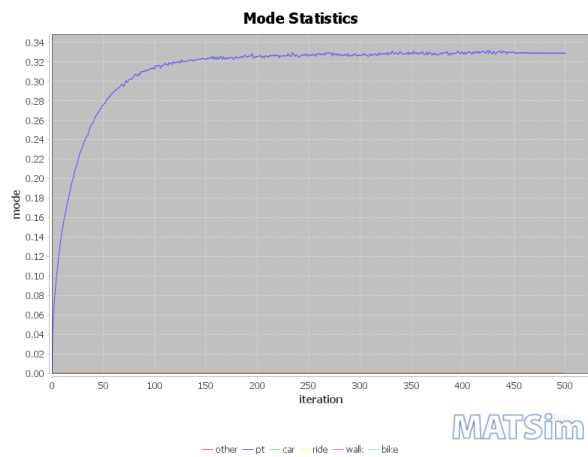


付録図 3 Mode Statistics(万博シナリオ)

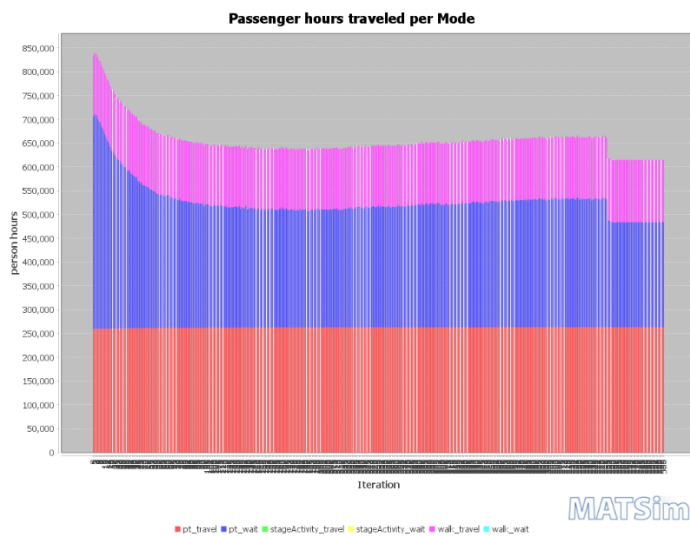


付録図 4 各モードに費やされた時間(万博シナリオ)

シャトルバスシナリオ



付録図 5 Mode Statistics(万博シナリオ)



付録図 6 各モードに費やされた時間(シャトルバスシナリオ)