

e チケットを用いた混雑緩和へ誘導する公共交通機関予約システム

○武村知昭 岩瀬一彦 張桀碩 阿部晶子 大久保友幸 林久志(東京都立産業技術大学院大学)

Public transportation reservation system that guides congestion relief with e-tickets

* T. Takemura, K. Iwase, J. Zhang, S. Abe, T. Ohkubo, and H. Hayashi (Advanced Institute of Industrial Technology)

概要— 現状の公共交通機関は先着順の乗車方法となっており、移動優先度の高い医療従事者が利用できない場合や、密状態での利用が発生している。また、一般ユーザも時と場合により、優先度の高い移動を行う必要がある。本稿では移動優先度、希望時間、仮想ポイントを元にした最大重みマッチングによる e チケット予約システムを提案する。本システムにより混雑度を上げずに、優先度とユーザの都合を考慮した予約が行えることを検証した。

キーワード: 優先度、希望時間、仮想ポイント、マッチング、e チケット、混雑緩和、誘導

1. はじめに

現在のコロナ禍において、また、新たな病原菌が発生した場合においても、パンデミックを防ぐためには密集を避けることが非常に重要である。しかし、東京では従来から公共交通機関を利用した移動が基本であり、通勤・通学時の混雑度が高いという課題がある。また、この混雑度が高いという状況は、コロナ禍における緊急事態宣言下においても、大きな変化はなかった。

今後、より安心・安全な移動を行うためには、通勤時間帯の調整や別の交通手段を使うことにより、混雑度を下げた移動方法が必要である。特に、緊急事態宣言下においても、医療従事者の通勤や、学生の通学は避けられなかったことから、優先度の高い利用者が優先的に移動でき、優先度の低い利用者は、利用時間を調整することにより、密集を避けた移動を促す社会交通システムが重要になると考えられる。

現状の公共交通機関は、希望時間毎にユーザの先着順を優先した利用方法になっている。そのため、通勤・通学時間帯において、医療従事者等の移動優先度の高いユーザが利用できない場合や、利用時においても混雑しているため、感染症の危険性が高い。また、移動優先度が通常のユーザにおいても、時と場合により、この日のこの時間はどうしても移動が必要な場合が発生するが、この点も考慮されていない。このことから、公共交通機関の利用時において、調和のとれた安心・安全な移動ができていないという課題がある。

本稿では、ユーザの移動優先度、希望時間帯、仮想ポイントを元に、ユーザと電車の最大重みマッチングを用い、優先度の高いユーザや、ユーザの都合を考慮しつつ、混雑緩和へ誘導する次世代の公共交通機関予約システムを提案する。ユーザの移動優先度は、ユーザカテゴリ毎にシステムがベースとして設定し、時期、時勢に応じて動的に変更できる。希望時間帯は、ユーザの希望を考慮できるようにするため、ユーザが第一希望から第三希望の時間帯を入力できる。仮想ポイントは、公平性・受容性の観点から導入し、ユーザが入

札時に利用することで、ユーザの時と場合に応じた希望を考慮可能にする。

本提案のシステムにより、混雑度を抑えながら、医療従事者のような移動必須のユーザへのチケット配布量を最大化すること、また、通常優先度である一般ユーザであっても、強く希望する時間帯に利用できるユーザ数を最大化することを目的にする。また、本提案システムの検証のため、python によるプログラミングとシミュレーション用のデータを用意して検証を行なった。その結果として、三密回避可能な混雑度である 25% に抑えつつ、一律の抑制と比較して、最優先ユーザの利用が 77%~84% 向上、また、優先度のみを使った場合と比較し、仮想ポイントを使った急用のある一般ユーザの利用がポイント入札分向上することを検証した。

本論文の残りは以下のように構成される。2 で関連研究について議論する。3 で問題設定を行う。4 で提案手法と評価方法を述べる。5 で評価結果を示す。6 で結果に対する考察を述べる。7 で結論をまとめる。

2. 関連研究

これまでも、車の移動に関しては混雑課金を利用することにより、混雑度を下げる研究の分析^{1),2)}や、混雑課金を導入することによる費用分析に関する研究^{3)~5)}が行われている。実際に 2020 東京オリンピックでも、オリンピック期間中の首都高利用には、1000 円上乗せの施策も実施され、高速道路の混雑解消に一定の効果があつた。このように、車の移動に対してはこれまでも混雑を下げる研究^{6)~9)}・施策が行われてきたが、公共交通機関に対する混雑解消研究の展開はこれからという段階である。

また、スマートフォンの普及により、様々な移動手段を組み合わせたマルチモーダルな移動の実現化も進んでおり、実運用に向けた課題研究^{10),11)}、最適な移動手段を提案する研究^{12)~24)}、疫病をいかに流行させずに人の移動が行えるようにするかの研究^{24),25)}が行われている。これらの研究では、公共交通機関を組み合わせ、ユーザに最適な移動手段を提案する研究を

行なっているが、ユーザの優先度や、ユーザのその時々
の都合を考慮した提案までは行われていない。

これらの状況から、公共交通機関を含めた様々な移動
手段に対して、利用者の優先度・希望をもとに、乗
車人数制限や乗車日時を最適化することにより混雑度
を下げ、安心・安全な移動手段を提供することが課題
である。

3. 問題設定

現状の公共交通機関は、希望時間毎にユーザの先着
順を優先した利用方法になっている。そのため、通勤・
通学時間帯において、Fig. 1 のように、医療従事者等
の移動優先度の高いユーザが利用できない場合や、利
用時においても混雑している状況が発生している。また、
移動優先度が通常のユーザにおいても、時と場合
により、この日のこの時間はどうしても移動が必要な
場合が発生するが、これらを考慮した公共交通機関の
予約はできない。



Fig. 1: 現状の公共交通機関利用の問題

現状の公共交通機関利用において、混雑度が高い状
況であること、また、移動優先度・希望が考慮されて
いないため、移動必須なユーザが移動できない場合
が発生していること、また、ユーザの時と場合に応じた
希望が考慮されていない問題がある。これらの問題に
対し、いかに公共交通機関の混雑度を下げつつ、優先
度の高いユーザ利用の最大化と、ユーザが希望する時
間帯に移動できるユーザを最大化できるかを検討する。

4. 提案手法と評価方法

4.1. 提案手法

混雑度の高い通勤・通学時間帯の公共交通機関に対
し、Fig. 2 のように移動目的に応じた公共交通機関利
用の優先度設定と、ユーザの希望時間、仮想ポイント
入札を元にした最大重みマッチングによるeチケット
配布により、混雑緩和へ誘導する公共交通機関予約シ
ステムを提案する。



Fig. 2: 提案手法による配布チケットの最適化

移動目的に応じた公共交通機関利用の優先度設定と
して、Table 1 の医療従事者の通勤、学生の通学、高
齢者の通院、一般の通勤を用い、それぞれ第一希望か
ら、第三希望までに対して優先度を設定する。コロナ
禍においては、医療提供体制を守ることを目的に、医
療従事者の優先度を最高にし、自宅でのリモートワー
クによる代替が可能な一般通勤者の優先度を最低にす
るなど、時期・時勢に応じて柔軟に優先度を変えるこ
とができる。

Table 1: システムが動的に変更できる重み（優先度）

	第一希望	第二希望	第三希望
医療	300	200	100
通学	299	199	99
高齢者	298	198	98
...			
一般の通勤	201	101	1

マッチング手法としては、マッチングの数を最大化
する最大マッチングもあるが、優先度設定や、希望順
位の重みを考慮するため、最大重みマッチングを利用
する。ただし、乗車人数、電車の本数、乗り換えの組
み合わせが増えていくと、計算時間が膨大になるとい
うアルゴリズムの課題があるため、Fig. 3 のユーザの
希望優先毎にマッチングを行うアルゴリズムにより、
処理時間を効率化する。

このアルゴリズムでは、ユーザの分類、第一希望か
ら第三希望までの時間帯、仮想ポイントを含む残ユー
ザリストから、まず、第一希望に対して処理を行う。
残ユーザリストから、ユーザと第一希望の残チケット
をノードとし、Fig. 5 のユーザ分類毎の優先度、仮想
ポイントから計算した重みをエッジに付与したグラフ
を作成する。このグラフに対して、NetworkX の最大重
みマッチング^{26), 27)} をかけ、マッチしたユーザと時間
帯のペアを取得し、マッチしたユーザを残ユーザリ
ストから、マッチしたチケットを残チケット数から差し
引く。この処理を第一希望から、第三希望まで繰り返
し、途中段階で残ユーザ数、残チケット数が0になっ
た場合は終了する。

```

remaining_users_list: 残ユーザリスト
choice: 希望順位
remaining_tickets_total: 残チケット数
weight: 重み (優先度)
match_users_list: マッチしたユーザリスト
match_times_list: マッチした時間帯のリスト
TOTAL_USER_CHOICE = 3: 最大希望順位

// 第一希望から第三希望まで、下記の処理を行う
for choice in range(TOTAL_USER_CHOICE)
// 残ユーザ数、残チケット数が無くなれば終了
if len(remaining_users_list) == 0 or

```

```

remaining_tickets_total == 0
break
for user in remaining_users_list
// Fig. 5 からユーザ毎の重みを計算する
weight = calculate_weight(user, choice)
// ユーザと希望時間帯のチケットをノードとし、
// 重みをエッジとしたグラフを作成する
graph.add_edge(user, user.choice.time, weight)
// 作成したグラフから最大重みマッチングを行い、
// マッチしたユーザと時間帯のリストを取得する
match_users_list, match_times_list =
max_weight_matching(graph)
// マッチしたユーザと時間帯のチケットを引く
remaining_users_list =
remaining_users_list.remove(match_users_list)
remaining_tickets_total = remaining_tickets_total -
len(match_times_list)

```

Fig. 3: ユーザと希望時間帯毎の最適化アルゴリズム

また、公平性、受容性の観点から仮想ポイントの仕組みを導入する。仮想ポイントは Fig. 4 のように、システムからユーザに対して毎週一定数を配布し、ユーザが計画的に運用する。ユーザは入札時に仮想ポイントを使用することで、一時的に優先度を上げることができるが、使い切ってしまった場合は、仮想ポイントが使えない状態となる。ただし、ユーザがシステム提案のチケットを使って移動した場合、マッチングから外れてチケットが貰えなかった場合、チケットを別のユーザに譲った場合に、仮想ポイントをボーナスとして追加で付与することにより、本システムの利用を促進し、社会全体で望ましい行動が取れるように誘導する。

- システムからユーザに対して毎週一定数を配布
- 以下の場合、さらにボーナスポイントを配布
 - システム提案のチケットを使って移動した場合
 - 入札したがチケットが貰えなかった場合
 - チケットを別のユーザに譲った場合

Fig. 4: 仮想ポイントの与え方

ユーザが仮想ポイントを入札した場合、Table 1 の重みに仮想ポイント分の重みを追加して計算する。また、乗り換えに関しても、なるべく全ての経路の電車のチケットが取れるように、既にチケットを持っているユーザの重みを大きくする。Fig. 5 は、上記を考慮した重み計算のアルゴリズムである。

BID_WEIGHT = 100: 仮想ポイント入札時のベースの重み
TRANSIT_WEIGHT = 100: 乗り換えチケットがある場合の追加の重み

```

calculate_weight(user, choice)
// Table 1 からユーザ分類毎の優先度を取得する
weight = lookup_weight_table(user, choice)
// 仮想ポイントがある場合、重みを大きくする
if user.bid_point != 0
weight = weight + BID_WEIGHT * user.bid_point
// 乗り換えチケットがある場合、重みを大きくする
if user.has_user_ticket == true
weight = weight + TRANSIT_WEIGHT
return weight

```

Fig. 5: 重み計算のアルゴリズム

Table 1 の例では、医療従事者の重みが最も大きく、一般通勤者が最も小さくなっているが、ユーザが仮想ポイントを入札した場合に、システムが重みを大きくすることにより、ユーザの都合に応じてチケット配布を調整できる。また、乗り換えの電車に乗れなくなってしまうことを避けるため、乗り換え前のチケットを持っているユーザの重みを大きくすることで、乗り換え後のチケットを優先的に取得することもできる。

4.2. 評価方法

本シミュレーションでは、プログラム言語 python を使い、提案手法の実装と検証を行う。評価軸として、公共交通機関の混雑度と、提案する移動手段の最適化を用いる。混雑度は、利用ユーザ数/安全利用人数で計算する。提案する移動手段の最適化は、いかに優先度の高いユーザが利用できたかどうかと、いかにユーザが希望する時間帯に利用できたかを示し、公共交通機関を利用できるユーザ毎の重みと、希望にマッチした重みの最大化を目的とする。

A. 単純例

Table 2 は、ユーザの希望入札から構築するユーザ希望シミュレーションデータである。この例では、医療従事者の通勤、学生の通学、高齢者の通院、一般通勤者2人の全5ユーザが、第三希望の時間帯まで入札し、さらに5番目の一般通勤者は、7:00 に仮想ポイントを入札している。

Table 2: ユーザ希望シミュレーションデータ

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	医療	7:00	0	6:45	0	6:30	0
2	通学	7:00	0	6:45	0	6:30	0
3	高齢者	7:00	0	6:45	0	6:30	0
4	一般の通勤	7:00	0	6:45	0	6:30	0
5	一般の通勤	7:00	1	6:45	0	6:30	0

B. 複雑例

より現実的な環境に近づけるために、国土交通省が発行している大都市交通センサスデータ²⁸⁾を用い、乗り換えの検証を行う。2017年発行の大都市交通センサス:初乗り・最終降車駅間経路別人員表データから、

鉄道定期券利用者が居住地を出発し、勤務・就学地へ向かう際に最初に乗車する初乗り駅である浦和駅から、最終降車する品川シーサイド駅までの移動において、浦和駅から上野駅まで東北本線、上野駅から大崎駅まで山手線、大崎駅から品川シーサイド駅までりんかい線で移動しているユーザが1日あたり52人いることが分かる。このケースでは、乗り換え2回、チケット3枚が必要になる。また、大都市交通センサスデータ：ターミナル別乗換人員表データから、浦和駅、上野駅、大崎駅における電車一本あたりの想定ユーザ数を算出する。

浦和駅のピーク時間帯の東北本線上りの初乗りが1322人であり、東北本線のピーク時1時間あたりの本数が9本であるため、初乗りは147人/本となる。通過人数は、東北本線の輸送力が1844人で当時の混雑率が120%として2212人/本、浦和駅最終降車は、大都市交通センサスデータ：ターミナル別乗換人員表データから、ピーク時間帯は2901人であり、322人/時間を差し引いて、約1890人/本となる。通過人数と初乗り人数を合わせて、2037人/本とする。

この値から、医療従事者、学生、高齢者、一般通勤の人数を、大都市交通センサス分析調査²⁹⁾をもとに算出する。高齢者である65歳以上と、65歳未満の割合が、10:90であり、通勤682万人、通学156万人のデータから、通勤と通学の割合も、81.4:18.6と算出できる。この通勤のうち、医療従事者の割合は、国税調査の産業別就業者の分析結果³⁰⁾から、医療、福祉が12.2%であり、このうち、医療業351万8千人、社会保険・社会福祉・介護事業が347万9千人、保健衛生が11万5千人から、医療のみは約6%と算出する。これらのデータから、高齢者:通学:医療従事者の通勤:その他の一般通勤=10:16.8:4.4:68.8とし、浦和駅の2037人/本のデータから、Table 3のユーザ毎の人数を算出する。

上野駅の場合は、山手線のピーク時が20本/時間であることと、様々な路線からの乗り換え元のデータも考慮する。ピーク時1時間あたりの初乗りが422人のため、21人/本となる。通過人数は、山手線の輸送力が1724人で、当時の混雑率が120%として2068人/本、上野駅最終降車は、大都市交通センサスデータ：ターミナル別乗換人員表データから、ピーク時間帯は3876人のため、193人/時間を差し引いて、1875人/本となる。また、ピーク時1時間あたりの東北本線からの乗り換えが2982人、それ以外からの乗り換えが14114人であるため、それぞれ、149人/本、706人/本となる。これらを合わせて、2751人/本とする。前述の割合を利用し、Table 3のユーザ毎の人数を算出する。

大崎駅の場合は、りんかい線のピーク時が12本/時間であることを考慮し、初乗りは54人のため、5人/本となる。山手線からの乗り換えは、246人のため、

21人/本となる。山手線以外からの乗り換えは、3023人なので251人/本となる。これらを合わせて、277人/本とする。大崎からのりんかい線は始発とし、通過人数は考慮しない。前述の割合を利用し、Table 3のユーザ毎の人数を算出する。

Table 3: 各駅の電車1本あたりの想定ユーザ数

	割合	東北本線	浦和駅	山手線	上野駅	りんかい線	大崎駅
高齢者	10%		204		275		28
通学	16.8%		341		461		46
医療	4.4%		90		123		12
一般の通勤	68.8%		1,402		1,892		191
合計	100%		2,037		2,751		277

このケースで三密回避可能な定員である1/4に絞ると、東北本線1844/4=461人、山手線1724/4=431人、りんかい線1300/4=325人となり、チケット配布数として設定する。この条件下で、ユーザ希望シミュレーションデータを、Table 4~6のユーザの優先度のみで、仮想ポイント入札がない場合と、Table 7~9のユーザの優先度と10人の一般通勤者が仮想ポイントを入札した場合のデータを用意する。

Table 4: ユーザ希望シミュレーションデータ (東北本線浦和駅 優先度のみ)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
205	通学	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
546	医療	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
636	一般の通勤	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
2037	一般の通勤	7:34	0	7:37	0	7:46	0

Table 5: ユーザ希望シミュレーションデータ (山手線上野駅 優先度のみ)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
276	通学	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
737	医療	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
860	一般の通勤	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
2751	一般の通勤	8:03	0	8:13	0	8:15	0

Table 6: ユーザ希望シミュレーションデータ (りんかい線大崎駅 優先度のみ)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
29	通学	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
75	医療	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
87	一般の通勤	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
277	一般の通勤	8:32	0	8:41	0	8:45	0

Table 7: ユーザ希望シミュレーションデータ (東北本線浦和駅 優先度, 一般通勤 10 人の仮想ポイント有)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
205	通学	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
546	医療	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
636	一般の通勤	7:34	1	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	1	7:37	0	7:46	0
646	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
...	...	7:34	0	7:37	0	7:46	0
2037	一般の通勤	7:34	0	7:37	0	7:46	0

Table 8: ユーザ希望シミュレーションデータ (山手線上野駅 優先度, 一般通勤 10 人の仮想ポイント有)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
276	通学	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
737	医療	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
860	一般の通勤	8:03	1	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	1	8:13	0	8:15	0
870	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
...	...	8:03	0	8:13	0	8:15	0
2751	一般の通勤	8:03	0	8:13	0	8:15	0

Table 9: ユーザ希望シミュレーションデータ (りんかい線 大崎駅 優先度, 一般通勤 10 人の仮想ポイント有)

index	ユーザ分類	第一希望	仮想ポイント	第二希望	仮想ポイント	第三希望	仮想ポイント
1	高齢者	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
29	通学	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
75	医療	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
87	一般の通勤	8:32	1	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	1	8:41	0	8:45	0
97	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
...	...	8:32	0	8:41	0	8:45	0
277	一般の通勤	8:32	0	8:41	0	8:45	0

5. 結果

A. 単純例

まず, 単純化したデータの検証結果を示す. Table 2 のユーザ希望シミュレーションデータに対し, 第一希望から第三希望まで, 1 枚ずつチケットがあるケースでは, 3 ユーザを割り当てることのできるため, 混雑度は 100%となる. 本提案のシステムを使わない場合, チケットが割り当てられるユーザは, 先着順あるいは, ランダムとなるため, 優先度が高い医療従事者がチケットを取得できず, リモートワーク可能な優先度の低い一般通勤者がチケットを入手できてしまう.

本提案を用いたシミュレーションにおいて, 仮想ポイントを考慮しない場合は, 重み順に医療従事者が第一希望の 7:00(重み 300), 学生が第二希望の 6:45(199), 高齢者が第三希望の 6:30(98)のチケットを取得でき, 重み合計は 597 となるが, 優先度の低い一般通勤者 2 人はチケットを入手できない. 仮想ポイントを考慮した場合は, 仮想ポイントを入力した 5 番目の一般通勤者の重みが大きくなるため, 5 番目の一般通勤者が第一希望の 7:00(301), 医療従事者が第二希望の 6:45(200), 学生が第三希望の 6:30(99)のチケットを取得し, 重み合計は 600 となり, 通常は優先度の低い一般通勤者もチケットを入手できる結果となる.

B. 複雑例

次にデータを拡張し, 処理時間のシミュレーションを行なった結果を示す. 国土交通省が発行している 2019 年度都市鉄道混雑率調査結果³¹⁾ から, JR 山手線外回り, 上野駅→御徒町駅のピーク時間帯 (6:40~9:40) における総乗車人数が約 10 万人であったため, 最大の希望ユーザ数を 10 万人として設定する. 10 万人のデータを作るため, 5 番目以降のユーザとして, 4 番目の一般通勤者と同じデータを使って拡張した固定データの場合と, ユーザ希望テーブルをランダムで作成したランダムデータの 2 パターンの処理時間を計測する. JR 山手線一本あたりの安全な利用人数を三密回避可能な定員の 1/4 の約 500 人で設定し, 処理時間を計測した結果が Fig. 6 である. 計測に使用した PC は, 8GB ユニファイドメモリ, 8 コア CPU, 7 コア GPU, 16 コア Neural Engine を搭載した Apple M1 チップを搭載する MacBook Air(2020)を利用している.

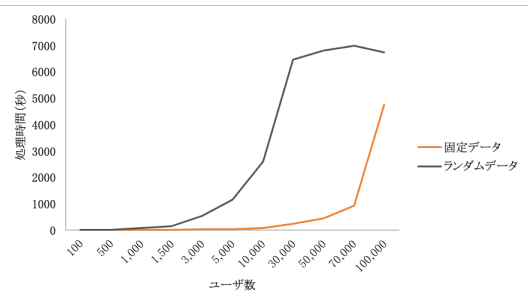


Fig. 6: 処理時間結果

固定データのケースでは, 希望ユーザ数 10 万人の場合に最大 4,742 秒かかり, ランダムデータのケースでは, 希望ユーザ数 7 万人の場合に, 最大の 6,982 秒かかる結果となった. どちらも 1, 2 時間程度の処理時間であるため, 前日までに希望の入札を締め切れば問題ないと言える.

次に乗り換えのケースについての, シミュレーション結果を示す. 前述の浦和駅から品川シーサイド駅の例において, 三密回避可能な定員である 1/4 に一律に絞ると, Table 10~12 に示すように, 東北本線浦和駅では, 高齢者 46 人, 通学 77 人, 医療従事者 20 人, 一般の通勤 317 人の合計 461 人がチケットを取得できるが, 残りの 1576 人はチケットが取得できず, その中でも特に優先度の高い医療従事者 70 人がチケットを取得できない. また, 山手線上野駅の場合においても, 三密回避可能な定員である 1/4 に絞ると, 高齢者 43 人, 通学 72 人, 医療従事者 19 人, 一般の通勤 296 人の合計 431 人がチケットを取得できるが, 残りの 2320 人はチケットが取得できず, その中でも優先度の高い医療従事者 103 人が取得できない. りんかい線大崎駅の場合は, 利用者が少ないため, 三密回避可能な定員である 1/4 に絞っても, 全員がチケットを取得できる.

Table 10: 東北本線浦和駅評価結果（定員の一律抑制）

	全体	取得可	取得不可
高齢者	204	46	158
通学	341	77	264
医療	90	20	70
一般の通勤	1,402	317	1,085
合計	2,037	461	1,576

Table 11: 山手線上野駅評価結果（定員の一律抑制）

	全体	取得可	取得不可
高齢者	275	43	232
通学	461	72	389
医療	123	19	103
一般の通勤	1,892	296	1,596
合計	2,751	431	2,320

Table 12: りんかい線大崎駅評価結果（定員の一律抑制）

	全体	取得可	取得不可
高齢者	28	28	0
通学	46	46	0
医療	12	12	0
一般の通勤	191	191	0
合計	277	277	0

全員がチケットを取得できない東北本線浦和駅、山手線上野駅のケースにおいて、ユーザが 7:34, 7:37, 7:46 の第三希望までチケット希望を出し、提案手法によるマッチングをかけると、Table 13 のように、7:34 のケースで医療従事者全 90 人、通学も全 341 人がチケットを取得可能に、高齢者は残りの 30 人がチケットを取得可能になった。一般の通勤は、7:34 のチケットは入手できないが、次の希望である 7:37 のチケットを 287 人が取得し、高齢者も同様に 174 人がチケットを取得可能になる。次の希望である 7:46 のチケットは、残りの一般の通勤 461 人が取得できる結果となった。

Table 13: 東北本線浦和駅評価結果（優先度のみ）

	全体	7:34	7:37	7:46	取得不可
高齢者	204	30	174	0	0
通学	341	341	0	0	0
医療	90	90	0	0	0
一般の通勤	1,402	0	287	461	653
合計	2,037	461	461	461	653

山手線上野駅も同様に、ユーザが 8:03, 8:13, 8:15 の第三希望までチケット希望を出し、提案手法によるマッチングをかけると、Table 14 の結果となった。

Table 14: 山手線上野駅評価結果（優先度のみ）

	全体	8:03	8:13	8:15	取得不可
高齢者	275	0	275	0	0
通学	461	308	152	0	0
医療	123	123	0	0	0
一般の通勤	1,892	0	3	431	1,458
合計	2,751	431	431	431	1,458

さらに、仮想ポイントを一般の通勤 10 人が第一希望の 7:34 に入れたケースでは、一般の通勤 10 人の優先度が上がり、チケットを優先的に取得できるようになる。その結果として、Table 15 のように一般の通勤の 10 人が取得できるが、高齢者 10 人が代替として取得できず、取得できる高齢者は 20 人の結果となった。

Table 15: 東北本線浦和駅評価結果（優先度、一般通勤 10 人の仮想ポイント有り）

	全体	7:34	7:37	7:46	取得不可
高齢者	204	20	184	0	0
通学	341	341	0	0	0
医療	90	90	0	0	0
一般の通勤	1,402	10	277	461	653
合計	2,037	461	461	461	653

加えて、乗り継ぎチケットの優先度も上がるため、山手線上野駅でも、一般通勤 10 人は第一希望のチケットを優先的に入手でき、Table 16 の結果となった。こちらも同様に、優先度の低い高齢者 10 人が代替として取得できず、取得できる高齢者は 298 人となった。

Table 16: 山手線上野駅評価結果（優先度、一般通勤 10 人の仮想ポイント有り）

	全体	8:03	8:13	8:15	取得不可
高齢者	275	0	269	7	0
通学	461	298	162	0	0
医療	123	123	0	0	0
一般の通勤	1,893	10	0	424	1,459
合計	2,752	431	431	431	1,459

混雑度を下げるために、ユーザの優先度、希望度を考慮せず、一律抑制した場合は Fig. 7 に示すように、最高優先度の医療従事者は浦和駅では 23%、上野駅では 16%しかチケットを取得できなかったが、優先度設定方式では、ともに 100%取得できることから、一律の抑制と比較して最優先ユーザの利用が 77~84% 向上した。

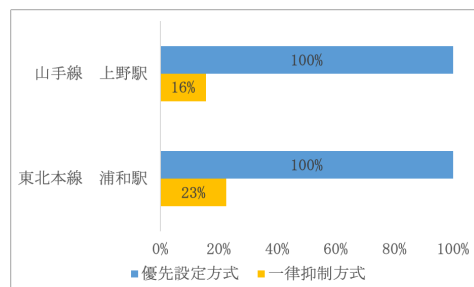


Fig. 7: 最優先ユーザにおける優先設定方式と一律抑制との比較

また、最低優先度の一般通勤の場合、Fig. 8 のように、優先設定のみでは、第一希望のチケットを入手することができなかったが、仮想ポイントを入札したユーザ数分、第一希望のチケットを入手できる割合が上がる結果となった。

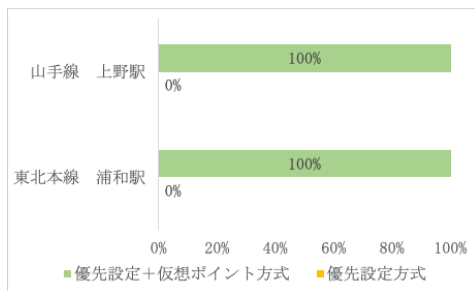


Fig. 8: 急用のある 10 名の一般ユーザーにおける優先設定方式+仮想ポイント方式と優先設定方式のみとの比較

6. 考察

本シミュレーションにより、ユーザーの移動目的・希望時間・仮想ポイントに応じた最大重みマッチングによる e チケット配布を行うことで、優先度の高いユーザーや、ユーザーの都合を考慮しつつ、混雑緩和を誘導する次世代の公共交通機関予約システムを検証した。三密回避可能な移動を実現するためには、公共交通機関を利用したいユーザー数がチケット配布数より多い場合が多々発生するが、システムが設定するユーザー毎の優先度設定とユーザーの第三希望までの希望時間帯を考慮した負荷分散により、チケット配布を最適化した。ただし、このままではシステムが決める優先度次第で常に同じ結果になり、公平性・受容性の問題が生じたため、ユーザーが入札時に利用できる仮想ポイントの仕組みを導入し、ユーザーの都合を考慮した優先度調整とチケット配布が行えることを検証した。

この結果は、ユーザー数、チケット配分数を増やしても同様の結果が得られ、処理時間に関しても、ユーザーの第一希望の時間帯から第三希望の時間帯毎にマッチング処理を行うアルゴリズムにより、数時間で終わることが分かった。ただし、直前での変更や、希望入札もあることを考慮し、直前の計算では、チケットを余らせている、あるいは、余っている数のみ、かつ、ユーザーの第一希望のみに絞ることで、さらに処理時間を短縮できると考える。

また、公平性・受容性の観点から導入した仮想ポイントの仕組みは、システムから最初にユーザーへ一定数を配布し、ユーザーの時と場合に応じた移動に、また、社会全体で調和の取れたユーザー行動の誘導としても有効であると考えられる。例えば、公共交通機関の利用希望者数が、配布可能なチケット数より多い場合に、システムがユーザーに通知し、チケットを譲渡したユーザーに対してボーナスポイントを付与することで、全体としてより良い行動を促すことができる。また、マッチしたチケットに従って移動した場合、また、希望が叶わなかった場合にも、ボーナスポイントを付与することにより、ユーザーにシステム提案の行動を誘導すること

ができる。将来的には仮想ポイントから、公共交通機関のチケット費用への連携や、他社ポイントとの連携により実社会の経済利用にも展開し、さらにより良いユーザー行動を促すことができると考える。

7. 結論

利用ユーザーの優先度・希望時間帯・仮想ポイントを考慮した e チケットを配布する新たな公共交通機関予約システムにより、混雑を回避した安心・安全な移動を誘導することができる。この優先度は動的に変更することができるため、時期、時勢、状況に応じてシステムが柔軟に調整することができることも本提案のメリットである。

また、公平性、受容性という観点から、仮想ポイントとオークションシステムを取り入れ、ユーザー希望による優先度調整についても検証した。この考え方により、リモートワーク時は不要だが、出勤時は仮想ポイントを付与することで、一時的に優先度を上げて、この日、この時間にどうしても公共交通機関を利用したいというユーザーの希望も満たすこともできる。

本稿では、ウィズコロナの時代において、また、新たなウイルスが発生した場合においても、移動すべきユーザーが優先的に三密を避けて安心・安全な移動を誘導する協調と調和の取れた次世代の公共交通機関予約システムを提案した。今後は、さらなる発展として、目的地までの電車以外の移動手段と混雑度も加味した、マルチモーダルな交通提案も重要になると考える。現在地点から目的地までの移動に対して、電車だけではなく、バス、キックボード、自転車なども組み合わせ、より安心・安全で、三密を回避した柔軟な移動手段をユーザーが選択できることが、次世代の公共交通機関の姿であると考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21K12144, および、JST AIP ネットワークラボ「日独仏 AI 研究」JPMJCR20G4 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) 円山琢也：都市域における混雑課金の政策分析：レビューと展望, 土木計画学研究・論文集, Vol. 26, 15/32 (2009)
- 2) 円山琢也：領域形状に着目した次善混雑課金の政策分析, 応用地域学研究, No. 20, 13/22 (2016)
- 3) X. Guo and H. Yang : Pareto-Improving Congestion Pricing and Revenue Refunding with Multiple User Classes, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 44, No. 8-9, 972/982 (2010)
- 4) L. Robin, and E. Verhoef : Traffic congestion and congestion pricing. In: Handbook of Transport Systems and Traffic Control (eds., Button KJ. and Hensher D.A.), Elsevier Science, 77/105 (2001)

- 5) E. Verhoef : Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 32, No. 3, 281/310 (2002)
- 6) Y. Yamanari, M. Miyao, S. Syo, T. Nishino and H. Hayashi : Dynamic Travel Permits Allocation Mechanism Based on Auction and Personal Trading Combination, 10th International Congress on Advanced Applied Informatics, 351/357 (2021)
- 7) L. Tian, H. Yang, and H. Huang : Tradable credit schemes for managing bottleneck congestion and modal split with heterogeneous users, *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, Vol. 54, 1/13 (2013)
- 8) F. Xiao, Z. Qian, and H. M. Zhang : Managing bottleneck congestion with tradable credits, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, 1/14 (2013)
- 9) E. Jonas : Road pricing with limited information and heterogeneous users: A successful case, *The annals of regional science*, Vol. 35, No. 4, 595/604 (2001)
- 10) 原祐輔 : 交通システムのメカニズムデザインとその動学化に向けた課題, 自動制御連合講演会講演論文集第 60 回自動制御連合講演会, 1336/1337 (2017)
- 11) 西田遼, 金森亮, 野田五十樹 : 実データとシミュレーションを用いた MaaS の導入効果の評価, 第 35 回人工知能学会全国大会 (2021)
- 12) H. Liu, T. Li, R. Hu, Y. Fu, J. Gu and H. Xiong : Joint Representation Learning for Multi-Modal Transportation Recommendation, 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence, 1036/1043 (2019)
- 13) P. Bonte, M. Brouwer, D. Arndt, M. Sande, P. Heyvaert, A. Dimou, P. Colpaert, R. Verborgh, F. Turck and F. Ongenaes : Context-Aware Route Planning: a Personalized and Situation-Aware Multi-Modal Transport Routing Approach, 19th International Semantic Web Conference (2012)
- 14) D. Wu, Y. Yin, S. Lawphongpanich and H. Yang : Design of More Equitable Congestion Pricing and Tradable Credit Schemes for Multimodal Transportation Networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, No. 9, 1273/1287 (2012)
- 15) A. Namoun, A. Tufail, N. Mehandjiev, A. Alrehaili, J. Akhlaghinia and E. Peytchev : An Eco-Friendly Multimodal Route Guidance System for Urban Areas Using Multi-Agent Technology, *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5, 1/30 (2021)
- 16) H. Liu, J. Han, Y. Fu, J. Zhou, X. Lu, and H. Xiong : Multi-Modal Transportation Recommendation with Unified Route Representation Learning, *VLDB Endowment*, Vol. 14, No. 3, 342/350 (2020)
- 17) H. Liu, Y. Tong, P.Zhang, X. Lu, J. Duan, and H. Zhang : Hydra: A Personalized and Context-Aware Multi-Modal Transportation Recommendation System, 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2314/2324 (2019)
- 18) M. Haqqani, X. Li, and X. Yu : Non-deterministic Journey Planning in Multi-modal Transportation Networks: A Meta-heuristic Approach, *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1098/1106 (2020)
- 19) M. Haqqani, X. Li, and X. Yu : Multi-Objective Journey Planning Under Uncertainty: A Genetic Approach, *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1262/1269 (1998)
- 20) Y.Liu, C. Lyu, Z. Liu, and J. Cao : Exploring a large-scale multi-modal transportation recommendation system, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.126, 103070 (2021)
- 21) K. Athakorn, S. Tuammee, and M. Tuominen : The development of a framework for route selection in multimodal transportation, *The International Journal of Logistics Management* (2014)
- 22) Noreikis, Marius, Pranas Butkus, and Jukka K. Nurminen : In-vehicle application for multimodal route planning and analysis, 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet). IEEE (2014)
- 23) N. Marius, P. Butkus, and J. K. Nurminen : In-vehicle application for multimodal route planning and analysis, 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet). IEEE (2014)
- 24) Y.An, X. Lin, M. Li, and F. He : Dynamic governance decisions on multi-modal inter-city travel during a large-scale epidemic spreading, *Transport Policy*, Vol.104, 29/42 (2021)
- 25) A. Rayash, and I. Dincer : Analysis of mobility trends during the COVID-19 coronavirus pandemic: Exploring the impacts on global aviation and travel in selected cities, *Energy research & social science*, Vol. 68, 101693 (2020)
- 26) NetworkX
https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithm/a/generated/networkx.algorithms.matching.max_weight_match_mat.html
- 27) Z. Galil : Efficient Algorithms for Finding Maximum Matching in Graphs, *ACM Computing Surveys*(1986)
- 28) 第 12 回大都市交通センサス調査結果集計表
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000035.html
- 29) 第 12 回大都市交通センサス 平成 29 年度調査 (分析)
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000091.html
- 30) 最新の労働統計 「医療, 福祉」に従事する者
<https://www.jil.go.jp/kokunai/blt/backnumber/2016/09/053.pdf>
- 31) 三大都市圏における主要区間等の混雑の見える化 (2019)
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001413552.pdf>