

ラストマイル・モビリティシェアリング 最適化モデルによる運用分析

山田 匡規, 木村 雅志, 高橋 直希, 吉瀬 章子

本稿では, 論文 [1] に基づき, 地域内ラストマイル・モビリティのシェアリング事業の運営ならびに新規事業の分析のため構築した最適化モデルならびにその分析結果を紹介する. 地域内ラストマイル・モビリティのシェアリングにおいては, 予約時に車両と行先の駐車枠の双方を予約する必要がある, 需要満足率を上げるためには配回送作業が必要となるが, 最適化モデルに基づく分析により, 収益率を上げるためスタッフによる配回送を回避しようとする傾向があることが確かめられた. また自動運転による自律的な配回送が実現できるのであれば, これを組み合わせることで利用者便益と事業者利益を両立できる可能性があることも示された.

キーワード: 次世代自動車交通基盤, ワンウェイ型カーシェアリング, ラストマイル・モビリティ, Mobility as a Service (MaaS), 自動配回送, 最適化モデル, 混合整数計画問題

1. はじめに

第5期科学技術基本計画 [2] に述べられているように, 日本政府は現在, 超スマート社会である“Society 5.0” [3] の実現を推進しており, カーシェアリングやライドシェアリングなどモビリティを用いた新しいサービス“Mobility as a Service (MaaS)”はその政策の柱の一つとなっている.

カーシェアリングは特にその手軽さから近年世界的に利用者が急増している輸送手段の一つである. たとえば Zipcar は, 2000 年に米国で設立されて以来カナダとヨーロッパに拡大し, 現在1億人以上のメンバーにサービスを提供している. その利用方法はスマートフォン・アプリで車両を見つけて予約し, メンバーカードをエントリーバッジとして使用するだけである. 2007 年に, ドイツのウルムにおけるフリーフロート・ワンウェイ型カーシェアリング実験として始まった car2go は, サービスエリア内であればどの場所でも車を返却することができる. この便利さが好まれて, 今や世界中

で事業を展開する世界最大のカーシェアリング会社となっている. 2011 年にパリで始められた Autolib' もワンウェイ型のカーシェアリングである. ただしこのサービスでは提供する車両すべてが電気自動車 (EV) であることから, 充電のため車両をステーションに戻す必要がある.

2012 年, 日本においても超小型 EV を用いた, ステーションベースのワンウェイ型カーシェアリングサービスが始まった. 横浜市と日産は「チョイモビ ヨコハマ」をリリースし, 低炭素社会と都市型観光を推進する2人乗りの EV シェアリングサービスを提供した. 最初の2年間はワンウェイ型サービスであったが, 現在ではラウンドトリップ型サービスとして提供されている. 同じく 2012 年, トヨタはラストマイル輸送のための新しいタイプのモビリティサービスである“Ha:mo RIDE” [4] を開始した. i-ROAD [5] や COMS [6] といった超小型 EV を用いたワンウェイ型シェアリングサービスを提供することで, 公共交通も利用した, ストレスフリーで環境にやさしい“Harmonious Mobility Network”を目指している. 豊田市を皮切りに, 東京, 沖縄, 岡山, フランスのグルノーブル, タイのチュロンコン大学でもサービスが展開された.

ワンウェイ型のカーシェアリングはユーザーに柔軟なサービスを提供するが, 移動需要と車両供給のアンバランスという問題が生じやすい. より需要満足度を高めるため, 多くのカーシェアリング事業者は, 時間帯ごとに, 需要が低いエリアから高いエリアへ車両を配回送するための雇用を行っているが, その人件費は利益を圧迫している. 雇用に依存しないアンバランス

やまだ まさき
筑波大学 未来社会工学開発研究センター
〒305-0005 茨城県つくば市天王台 1-1-1 IIIS 棟 4F
yamada.masaki.ff@un.tsukuba.ac.jp
きむら まさし
NTT データ
〒135-6033 東京都江東区豊洲 3-3-3 豊洲センタービル
たかはし なおき
筑波大学大学院システム情報工学研究科
よしせ あきこ
筑波大学システム情報系
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
yoshise@sk.tsukuba.ac.jp

解消方法としては、需要が高いエリアからの利用料金を割増す（あるいは需要が低いエリアからの利用料金を割引く）方法もある [7]。Uber や Lyft などのシェアリングサービスでは、需要側と供給側の双方を制御する動的な料金体系が適用されている [8]。需要満足度と収益を増やすため、企業は運転手側にとって魅力的な割増しを行い（供給の増加）、潜在的ユーザーを抑制する（需要の減少）。さらに自動車メーカーと提携することにより、車両利用率を向上させる自動運転車両も開発している [9]。

筆者らによる論文 [1] では、“Ha:mo RIDE” を念頭に、地域内移動のためのワンウェイ型シェアリングサービスについて、そのサービス固有の特徴を加味して収益を最大化する最適化モデルを提案し運営方法を議論している。さらにこのモデルを基本として、料金の割増サービス（プレミアムサービス）や自動運転車両の導入の効果についても議論を行っている。本稿ではこの論文の概要を紹介する。

2. ラストマイル・モビリティシェアリング

地域内といった短中距離を補完する端末交通システムを用いたラストマイルのモビリティシェアリングは、従来のワンウェイ型カーシェアリングとは異なる点がある。本節では、Ha:mo RIDE を例としてその特徴を説明する。

まずラストマイル移動の足であることから、車両は公共交通機関の駅やバス停、ショッピングモール、オフィス、自宅など、個人の関心のある場所に近い場所に駐車することを想定している（図 1）。さらに一般的に利用時間が短い。バスやタクシーの利用と同様、寄り道することなく、移動し終えたらすぐに利用を終了する傾向が強いことが、Ha:mo RIDE 豊田の利用実績データでも確認されている。

ほかのカーシェアリング同様、出発時に車両を予約するが、短距離しか利用しないにもかかわらず、行先での駐車場探しに時間がかかってはサービスの意味はない。そこで出発ステーションでの車両に加えて、行先ステーションの駐車枠も予約する。これは短距離ラストマイル・モビリティサービスの最大の特徴であり、この予約により、移動先で駐車はスムーズになるが、車両があっても移動先の駐車枠の空きがないために利用できない事態がしばしば起きる（図 2）。円滑なサービスを提供するためには、空き車両と空き駐車枠の双方のリソースを注意深く管理する必要がある。

需要と供給のアンバランスを解消するため、うまく

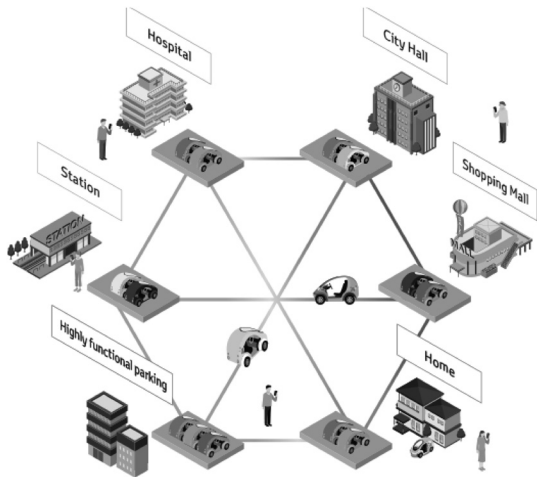


図 1 ラストマイル・モビリティ・ネットワーク：Ha:mo RIDE [4]

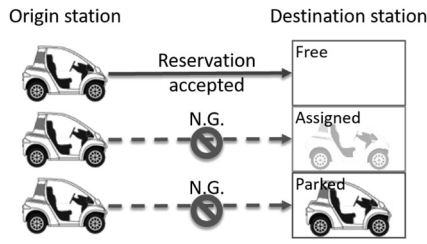


図 2 駐車枠がなければ予約できない

車両配置や配回送のスタッフシフトを決める必要があるが、カンやコツといった経験に基づいて決めているのが実態である。配回送オペレーションも、ステーションごとに配回送する車両台数の閾値など決められているが、実際は現場のスタッフの判断に委ねられている。短距離ラストマイル・モビリティサービスの実態に即したモデル化を行い、厳密に計算を行うことで、最適な車両配置・配回送シフトにより、どれだけ多くの利用が可能となり、収益を増やすことができるのか、検証を行う必要がある。

2.1 最適な車両配置と配回送のための基本モデル

論文 [1] では、Boyaci et al. [10] のカーシェアリング車両配置・配回送最適化モデルをベースとして、短距離ラストマイル・モビリティシェアリングサービスにおける車両配置・配回送最適化モデルを構築している。論文 [1] の基本モデルで想定している条件は以下のとおりである。

1. ステーションと期間の組を頂点とする時空間ネットワークを用いている。Boyaci et al. [10] は時間刻みを 15 分としているが、ラストマイル・モ

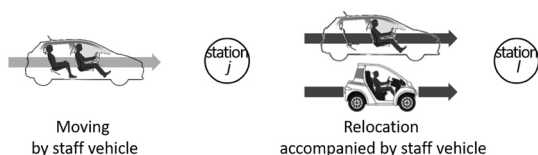


図3 スタッフカーによる移動と配回送

ビリティの利用時間は比較的短いことから時間刻み（1 期間）を 5 分としている。

2. 利用需要について、実際は 30 分前からしか知れないが、最適な運営方法の分析を目的とすることから、1 日分の利用需要を所与としている。予約と出発は同時に行われるとしキャンセルは考慮していない。
3. 前述したように、短距離ラストマイル・モビリティならではの条件として、出発地の車両だけではなく移動先の空き駐車枠も確保する。
4. 利用時間について、「 α （定数）」を貸出・返却時の手間として移動距離によらない一定時間とし、「利用時間＝移動時間＋ α （定数）」とした。ほんの数分の「 α （定数）」が無視できない点も短距離ラストマイル・モビリティの特徴である。
5. 移動時間は、時間帯ごとの交通状況を踏まえたパラメータとして与えている。このため同じステーション間でも、時間帯や移動の向きが異なれば移動時間は異なる。
6. すべての移動あるいは配回送は少なくとも 1 期間を要する。
7. ネットワーク上の各頂点はステーション j と期間 t の組 (j, t) で与えられ、各頂点の状態は、駐車している車両数、予約済の駐車枠数、配回送スタッフの人数で与えられる。
8. 各車両の状態は、「フリー」または「予約済」のいずれか一つである。「予約済」にはユーザーの乗車やスタッフの配回送の状態も含まれる。
9. 各駐車枠の状態は、「フリー」（利用可）、「予約済み」（利用不可）、「駐車中」（利用不可）のいずれか一つである。
10. 各配回送スタッフの状態は、「待機」、「移動」、「配回送」のいずれか一つである。
11. 開始時刻と終了時刻で記述される複数の勤務シフトが与えられており、配回送スタッフはその一つに従い勤務する。マネージャーは所定のシフトで必ず勤務するが、ほかのスタッフは配回送が不要であればそのシフトには勤務しない。
12. 配回送スタッフ複数人で 1 チームを構成し、ス

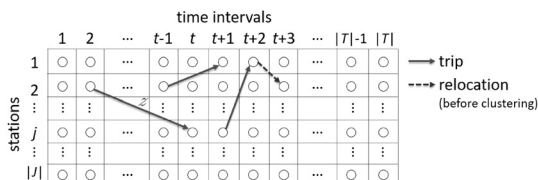


図4 時空間ネットワークと車両の動きを表す有向枝

タッフカーで移動する（図 3）。

13. 車両の駆動バッテリーの充電状態（State of charge, SOC）は考慮しない。走行距離が短いため、SOC 低下で利用不可になることは少ない。このことは、Ha:mO RIDE 豊田のケーススタディでも確認されている¹。
14. 車両の最大数、ステーションの配置（駐車枠数）による最適解の影響を調べるため、これらを可変なパラメータとして与える。

仮定 3, 4, 9, 12, 13 は短距離ラストマイル・モビリティならではの仮定である。

図 4 は、このモデルで使用している時空間ネットワークの例であり、有向枝は移動と配回送を表している。

[1] では以下の考え方でネットワークを構築している。

- ・有向枝は頂点間の車両の動きを表す。この図では、車両の移動三つと、配回送一つ（頂点 $(1, t+2)$ から頂点 $(2, t+3)$ に移動）が示されている。
- ・各車両は各期間でただ一つの状態しか保持しないので、期間 t でステーション j から出発する車両は、前の期間 $t-1$ の終わりまでに準備ができていなければならない。期間 t にステーション j に到着した車両は、次の期間 $t+1$ から準備が整う。駐車枠や配回送スタッフについても同様である。
- ・移動開始時点から、移動先の駐車枠は予約されていなければならない。たとえば、頂点 $(2, 2)$ から頂点 (j, t) への移動では、ステーション j における駐車枠一つが期間 2 のはじめてから予約されていなければならない。
- ・スタッフカーを運転しなければならないので、配回送には配回送スタッフ以外に別のスタッフが必ず伴う。頂点 $(1, t+2)$ から頂点 $(2, t+3)$ への配回送では、同じ車両で配回送スタッフ 1 名が移動する。
- ・さらにスタッフカーは、配回送のみならずスタッフのステーション間移動にも利用できる。ただし移動は連続的である必要があり、たとえば今頂点

¹ Shimazaki et al. [11] のシミュレータ改良版を使用。

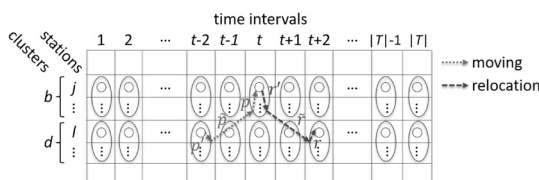


図5 ステーションのクラスターを用いた時空間ネットワーク上での移動と配回送

(2, $t+3$) にいる場合、スタッフはスタッフカーなしでステーション2から動くことはできない。

以上の制約を混合整数計画問題としてそのまま定式化すると、変数の数が非常に多くなり現実的な時間で解くことができなくなるため、論文 [1] では近接するステーションを一つにまとめるクラスタリングを行っている。図5は、ステーションのクラスターを用いた時空間ネットワーク上での移動と配回送の有向枝を示したものである。

クラスタリングの導入に伴い、車両ならびにスタッフとともに、移動を三つの部分に分割する。たとえば頂点 (j, t) から頂点 $(l, t+2)$ への移動は、以下のように分割される。

1. 出発するステーション j から出発するステーションのクラスター b までの期間 t 中の移動
2. 期間 t にクラスター b から出発して期間 $t+2$ に行先のステーションのクラスター d に向かう移動
3. クラスター d から行先ステーション l までの期間 $t+2$ 中の移動

クラスタリングを行わない場合、時空間ネットワーク上で移動と配回送を表す変数の数のオーダーはほぼ $O(|J|^2|T|)$ (ただし J はステーション集合、 T は期間の集合) で与えられる。しかしステーションをクラスター集合 B にクラスタリングし、スタッフの移動と配回送をクラスター間で行うとすれば、変数のオーダーは $O(|J||T| + |B|^2|T|)$ となる。クラスター数が $|B| \leq \sqrt{|J|}$ を満たすのであれば、変数の数のオーダーを $O(|J||T|)$ まで減らすことができる。

このようなモデル化を行ったうえで、[1] では、需要が満たされる (ユーザーの移動が実現できる) ことで得られる収益と、配回送スタッフの人件費、およびクラスター間での配回送ならびに移動コスト (スタッフカーの燃料費) を含む1日の総利益を最大にする最適化モデル (基本モデル) を提案している。さらに、 $|B| \leq \sqrt{|J|}$ を満たし、かつクラスタリングによって生じるステーション間の距離の誤差をなるべく小さくする、 k -Medoid 法に類似するクラスタリングアルゴリズム

Distance between stations

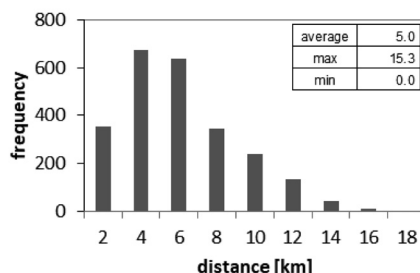


図6 Google Maps Distance Matrix API で得られた移動距離分布

Trip duration between stations (12:30pm)

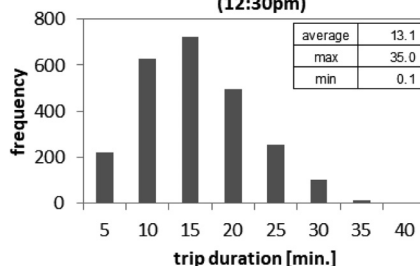


図7 Google Maps Distance Matrix API で得られた移動時間分布

を提案し、現実的な時間で、許容できる誤差の最適解が求められることを示している。

3. Ha:mo RIDE 豊田のケーススタディ

この節では論文 [1] において、前述の基本モデルに対して、実際の Ha:mo RIDE 豊田のデータを用いて計算実験を行った結果を紹介する。実験にあたっては、Intel Xeon E5-1630 v3 (3.70 GHz), 64 GB の PC と、OS Windows 8.1 Pro, ソルバー Gurobi Optimizer 7.0.2. が使用されている。

3.1 入力データの設定

Ha:mo RIDE 豊田は2012年に実証実験を開始し、現在もステーションを拡大しながら営業を続けている (2017年時点で55カ所)。[1] では、トヨタ自動車株式会社から提供を受けた、2016年4月1日から2017年3月31日までの Ha:mo RIDE 豊田のデータをもとに、車両初期配置と配回送スタッフシフトのオペレーションレベルの最適化を行った。

各ステーション間の各期間における移動時間は、Google Maps Distance Matrix API [12] を使用して推定している。図6、図7は、Google Maps Distance Matrix API が算出した移動距離と移動時間のヒストグラムである。

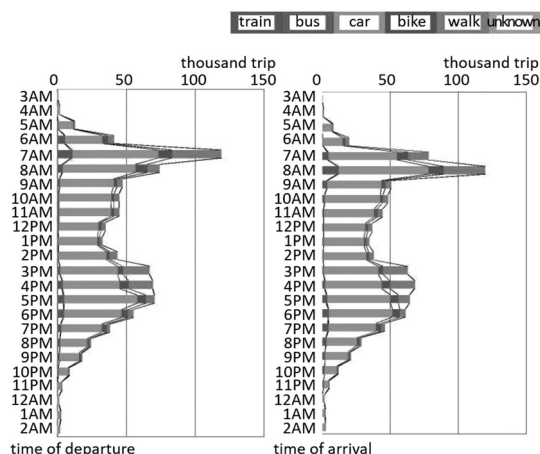


図8 2011年のパーソントリップ調査における豊田市の流入出トリップデータ

Ha:mo RIDE 豊田において、全ステーション数は55、全駐車枠数は266、最大車両数は90台である。最適化した時間帯は、需要レベルが高く、すべてのステーションが稼働している、午前6時から深夜12時に限定した。計算実験には、Ha:mo RIDE 豊田の実際の利用データを使用した。非公開であるため、参考情報として、利用データと類似の分布をもつ2011年のパーソントリップ調査における豊田市のデータを図8に示す。

前節で述べたように、 $|B| \leq \sqrt{|J|}$ （ただし B はクラスター集合、 J はステーション集合）であるようにクラスター数を選ぶとすると、 $\sqrt{55} \approx 7.4$ 以下が好ましいが、クラスター数を少なくすればステーション間の距離の誤差が大きくなる。各クラスター数に対してアルゴリズムを1,000回の試行した平均から、ステーション間の距離の誤差が急激に大きくなるのはクラスター5であることが確かめられたため、この実験ではクラスター数として7を採用した。図9はこの結果得られたクラスターを頂点の記号で区別して地図上に示したものである。

配回送スタッフのシフトは、図10のスタッフシフト#1を使用した。スタッフシフト#1は、マネージャーに相当するフルタイムシフト0と、夜間の高需要時間帯をカバーするパートタイムシフト1から構成されている。実際にはより多くの種類のシフトが採用されているが、現実的な時間内で最適化を行うため、この二つのシフトに限定している。配回送スタッフの総数は5名であり、スタッフの人件費は任意のシフトに対して900円/時であり、最大人件費は¥27,000、1日当たりのべ30時間分に設定した。

実際の利用データには、機会損失した潜在需要は現

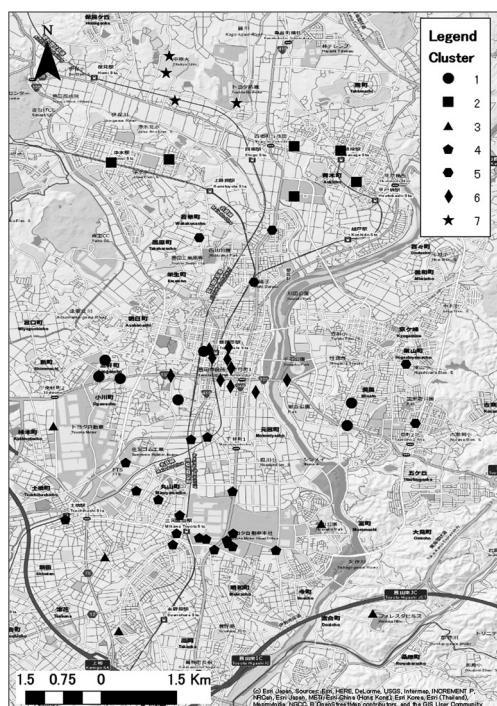


図9 Ha:mo RIDE 豊田のステーションマップ



図10 スタッフシフト#1

れない。論文[1]では、何度も最適化を行うことを想定して、ポアソン分布を用いて利用履歴から潜在需要を確率的に生成した。

移動運賃は、実際の運賃（初乗り10分200円、以降毎分20円）を用いて計算している。配回送・移動コストは、平均時速20km、燃費リッター当30km（コンパクトカー相当）、燃料費リッター当100円で算出した。

3.2 車両配置・配回送基本モデルの実験結果

3.1節で述べた入力を与え、基本モデルで50回（50日）の数値実験を行った結果が表1中の「シフト#1」列である（需要満足率、利益は実際の利用実績との比で表している）。

利用実績に基づく需要を与えたにもかかわらず、需要満足率は83.5%に過ぎない。実際のオペレーションでは配回送スタッフのべ5名で積極的に配回送するのに対し、最適解ではマネージャー1名のみで（マネージャー1名は必ず勤務する制約条件がある）、積極的に配回送を行わず（配回送は4.4回で実際の約1/5）、人件費の抑制により利益を最大化した結果となっている。

そこで、多人数による配回送に見合う需要の高い時

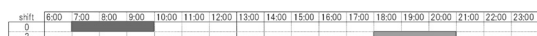


図 11 スタッフシフト#2 (高需要時間帯のみ)

表 1 基本モデルの最適化結果と利用実績との比較

	シフト#1	シフト#2	1.5× 需要	利用実績
需要満足率 [%]	83.5	81.3	105.9	100.0
就労スタッフ数	1.0	1.0	1.0	5.0
使用車両数	56.1	55.3	69.8	90.0
配回送数	4.4	2.0	2.2	21.8
利益率	1.97	2.54	3.53	1.0
収益率	0.84	0.82	1.12	1.0
労務费率	0.37	0.10	0.10	1.0
配回送・移動费率	0.37	0.15	0.19	1.0

間に限ったシフト「スタッフシフト#2」(図 11) と、さらに需要を一様に 1.5 倍したケースの追加実験を行った。結果は表 1 の「シフト#2」と「1.5× 需要」列に示されている。いずれのケースでも配回送スタッフは 1 名のままで変わらず、配回送の回数も増加しない。

利益の最大化を目的とした場合、スタッフによる配回送を行わないことが最適解となった。つまり、域内・短距離のラストマイル・モビリティでは、1 回当たりの利用時間が短いため配回送の人件費に見合う売上増が見込めず、空き駐車枠が足らなくなるよう少ない車両を投入して成り行きに任せるのが最適なオペレーションとなる。それでも事業者が人件費をかけて配回送を行うのは、需要満足率の低下が客離れを招いて長期的な収入低下につながるのを防ぐ必要に迫られて、やむを得ず実施していると考えられる。

3.3 新規事業の可能性：自動運転の導入

前節で見たように、現状のサービスでは配回送により得られる売上の増加を配回送コストの増加が上回るために実質的に配回送されない結果となった。論文 [1] では、より配回送を行って需要満足率が高くなるよう、以下二つの新規事業の可能性を検討している。

1. 配回送コストの増加をカバーするようプレミアム料金を付加した「プレミアム・サービス」の導入²
2. 配回送コスト低減のため車両を自律的に配回送する「配回送自動運転」の導入³

いわゆる「ロボットタクシー」をはじめ、自動運転の実現には越えなければならないさまざまな(技術的、法的、社会的な)課題があるが、[1] では、無人(乗客

表 2 配回送自動運転導入モデルでの最適化結果

(a) 移動時間 5 倍 (歩行速度相当)

	総需要	×1.2	×1.5	×2.0
需要満足率 [%]	99.8	99.7	99.4	
使用車両数	69.4	78.4	88.5	
配回送数	33.9	53.1	83.6	
配回送数/車両数	0.49	0.68	0.94	
(駐車枠数 + 2× 配回送数) / 車両数	4.81	4.75	4.89	
利益率 (対基本最適化モデル)	1.6	1.6	1.7	
収益率	1.2	1.3	1.4	
配回送・移動费率	6.0	9.1	13.8	

(b) 移動時間 50 倍 (匍匐前進速度相当)

	総需要	×1.2	×1.5	×2.0
需要満足率 [%]	94.6	90.7	83.6	
使用車両数	73.9	85.5	89.9	
配回送数	24.5	34.8	46.6	
配回送数/車両数	0.33	0.41	0.52	
(駐車枠数 + 2× 配回送数) / 車両数	4.26	3.93	4.00	
利益率 (対基本最適化モデル)	1.6	1.5	1.5	
収益率	1.2	1.2	1.2	
配回送・移動费率	3.9	5.2	6.5	

を乗せない・付き添わない) で配回送のみを行うケースを想定している。

自動配回送では乗客を乗せないためそれほど高い速度で走る必要はなく、安全性や社会受容性を考慮すると、車道や歩道に設けた専用ないしは優先レーンを低速で走行するのがより実現性が高いと考えられる。自動操舵の上限速度 10 km/h⁴ や歩行速度 6 km/h⁵ を鑑みると、自動配回送はスタッフによる配回送の 5~6 倍程度の移動時間がかかるとするのが妥当と考えられる。

[1] では、自動配回送にかかる移動時間を平均時速 20 km の 5 倍 (歩行速度に相当)、50 倍 (匍匐前進速度に相当) の 2 水準とした。実際には自動運転が可能なルートや時間帯は限定される可能性が高いが、ここでは特に制限を設けず全ステーション間で自動配回送が行われ、さらに、自動配回送により受け入れ可能な需要が増加すると仮定する。現状の需要 (= 利用数) を一律 1.2, 1.5, 2.0 倍したケースで実験を行った。

50 回 (50 日) の数値実験を行った結果の平均値を表 2 に示す。需要満足率、利益などは、別途計算した各需要数相当の現状サービスの結果との比で表現している。

² RideGuru, “How to Navigate Lyft’s Prime Time Fares,” <https://ride.guru/content/newsroom/how-to-navigate-lyfts-prime-time-fares>

³ Uber, “Steel City’s New Wheels,” <https://www.uber.com/blog/pittsburgh/new-wheels/>

⁴ ただし、自動車基準調和世界フォーラム (WP29) で緩和が議論されている。

⁵ 日本では内閣府令により歩行補助車 (歩道を走行) の速度は時速 6 km 未満とされる。

移動時間 5 倍（歩行速度相当）のケースでは、需要 2.0 倍でも需要満足率は 99%以上を維持している。移動時間 50 倍（匍匐前進速度相当）では、需要 1.5 倍でサービス率 90%，2.0 倍で 84%まで低下するが、現状サービスの最適解（需要満足率 83.5%）と同程度を維持し、絶対値では約 2 倍の需要に応えられている。事業者の利益についても、配回送コストが増加するものの売上の数十分の一に過ぎないため、ベースケースに対し利益が 5 割前後増加する結果が得られた。

需要の増加に伴い、稼働車両数、配回送数とも増加し、需要 2.0 倍ではほぼ全車両を投入、車両 1 台当たりの配回送数も需要とともに増加している。これは、駐車枠数の上限があり車両を増加するだけでは駐車枠リソースが不足する恐れがあるため、車両を高頻度に配回送することで効率的に運用していると考えられる。（また移動時間 5 倍のケースでは、車両数と駐車枠数の比（1：5 弱）を、（車両数）：（駐車枠数 + 2 × 配回送数）と読み替えると、おおむね一定に保たれていることが確認できた。これは、1 回の配回送で配回送元と配回送先の双方のステーションで駐車枠が増える効果があるためと考えられる（配回送元では空き駐車枠が増え、回送先でも回送中は駐車枠が増える）。

移動時間 50 倍のケースでは、投入車両数の増加に比べて配回送数の増加は鈍い。これは、配回送時間が長いから、需要の増加に配回送が追いつかないためと考えられる（通常 15 分の道のりを 12.5 時間（15 分 × 50 = 750 分）かけて移動する）。さらに、ステーションクラスタリングにより近接したステーション間の配回送がクラスタ間の最も長い配回送に置き換えられるため、相当数の配回送がクラスタリングにより実施されなくなっている可能性がある。

ステーションクラスタリングがどのように結果に影響を与えるかを調べるために、ステーションクラスタリングのない低速自動配回送モデルも作成し実験を行った。配回送スタッフ用の変数が不要になるため、クラスタリングがないモデルは、元のモデルに比べ計算コストが低く、クラスタリングを行わなくても高速に最適解を求めることができる。

移動時間 50 倍の場合では、クラスタリングされていない場合、クラスタリングされた場合よりも配回送の回数が多くなる。これは、ステーションクラスタリングが隣接ステーション間の配回送を妨げていることを示唆している。超低速の場合であっても、ステーションクラスタリングを行わないことで、移動時間 5 倍の場合と同様に、車両が有効利用され、需要満足率は

表 3 配回送自動運転導入モデルでの最適化結果
（ステーションクラスタリングによる影響）

(a) 移動時間 5 倍（歩行速度相当）

クラスタリング	有	無
需要満足率 [%]	99.7	99.9
使用車両数	78.4	85.5
配回送数	53.1	68.3
配回送数/車両数	0.68	0.80
(駐車枠数 + 2 × 配回送数) / 車両数	4.75	4.71
計算時間 [sec]	0.66	7.44

(b) 移動時間 5 倍（匍匐前進速度相当）

クラスタリング	有	無
需要満足率 [%]	90.7	98.8
使用車両数	85.5	87.4
配回送数	34.8	69.7
配回送数/車両数	0.41	0.80
(駐車枠数 + 2 × 配回送数) / 車両数	3.93	4.64
計算時間 [sec]	0.35	6.32

は 99%に改善された。また、（駐車枠数 + 2 × 配回送数）：車両数の比率が同じレベルまで上昇したことは、自律的移動により駐車容量を十分に拡大できたことを示唆している。適切なスピードで自動配回送を行うことは、駐車枠数の少なさも補うため、小規模（駐車枠数の少ない）ステーションが多い地域内ラストマイル・モビリティには適していると考えられる。

4. おわりに

本稿では、論文 [1] に基づき、地域内ラストマイル・モビリティのシェアリング事業の運営に関する最適化モデルとそれに基づく分析結果を紹介した。地域内ラストマイル・モビリティのシェアリングにおいては、予約時に車両と行先の駐車枠の双方を予約する必要があるが、需要満足率を上げるためにはスタッフによる配回送作業が必要になるが、最適化モデルに基づく分析により、収益率を上げるためスタッフによる配回送を回避しようとする傾向があることが確かめられた。また自動運転による自律的な配回送を組み合わせることで、利用者便益と事業者利益を両立できる可能性があることも示した。

現実には、自動運転に関する規制や道路環境などの制約により、自動運転による自律的な配回送を、全ステーション間で直ちに導入することは難しい。超低速な小型モビリティが公道を走ることによる交通渋滞なども十分考慮する必要がある。

また論文 [1] では、1 日のはじめにその日全体の需要

が与えられると仮定しているが、実際には乗車の30分前までの需要しか与えられない。さらに1年間の平均需要から需要データを生成しているが、需要偏差は無視している。より精緻な需要予測や、実際の運用を見据えた局所的情報からの車両配置・配回送ルールの作成とシミュレーション実験は今後の大きな課題である。

状況に適応的な料金設定も重要な課題である。これは、Ha:mo RIDEにおいて研究されてはいるが、まだ実施には至っていない。自動車と駐車場の供給による需要のバランスを調整するため、どのような状況でどのような料金設定を行うことが望ましいかについては、今後計量モデル的な見地からも検討される必要がある。

謝辞 本研究は、筑波大学とトヨタ自動車の共同研究「次世代社会システムとモビリティのあり方に関する研究」の支援を受けている。

参考文献

- [1] M. Yamada, M. Kimura, N. Takahashi and A. Yoshise, “Optimization-based analysis of last-mile one-way mobility sharing,” Department of Policy and Planning Sciences Discussion Paper Series 1353, University of Tsukuba, 2018, <http://infoshako.sk.tsukuba.ac.jp/~databank/pdf/1353.pdf> (2018年4月3日閲覧)
- [2] 内閣府, 「第5期科学技術基本計画の概要」, http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5basicplan_en.pdf (2018年4月3日閲覧)
- [3] 首相官邸, 「未来投資戦略2017」, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2017_t.pdf (2018年4月3日閲覧)
- [4] トヨタ自動車, “Ha:mo, Harmonious Mobility Network,” 2013, http://www.toyota-global.com/innovation/intelligent_transport_systems/hamo/ (2018年4月3日閲覧)
- [5] トヨタ自動車, “i-ROAD,” 2014, http://www.toyota-global.com/innovation/personal_mobility/i-road/ (2018年4月3日閲覧)
- [6] トヨタ車体, “COMS,” 2012, <http://coms.toyotabody.jp/> (2018年4月3日閲覧)
- [7] M. Drwal, E. Gerding, S. Stein, K. Hayakawa and H. Kitaoka, “Adaptive pricing mechanisms for on-demand mobility,” In *Proceedings of 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2017.
- [8] RideGuru, “How to Navigate Lyft’s Prime Time Fares,” 2016, <https://ride.guru/content/newsroom/how-to-navigate-lyfts-prime-time-fares> (2018年4月3日閲覧)
- [9] Uber, “Steel City’s New Wheels,” 2016, <https://www.uber.com/blog/pittsburgh/new-wheels/> (2018年4月3日閲覧)
- [10] B. Boyaci, K. G. Zografos and N. Geroliminis, “An integrated optimization-simulation framework for vehicle and personnel relocations of electric carsharing systems with reservations,” *Transportation Research Part B*, **95**, pp. 214–237, 2017.
- [11] K. Shimazaki, M. Kuwahara, A. Yoshioka, Y. Homma, M. Yamada and A. Matsui, “Development of a simulator for one-way ev sharing service,” In *Proceedings of 20th ITS World Congress Tokyo 2013*, 2013.
- [12] Google, “Google Maps Distance Matrix API,” 2017, <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/> (2018年4月3日閲覧)