

道路渋滞を考慮した Car/Ride-Share システムの待ち行列解析

中村 彩音, フンドック トウアン, 安東 弘泰

本稿では、MaaS の一環として混雑の緩和や経済効果への貢献が期待される新しいコンセプトの交通手段“Car/Ride-Share”について考察する。Car/Ride-Share システムを二つの待ち行列モデルに分解して考える近似モデルを考案し、道路渋滞を考慮したうえでの利用客の平均所要時間、実行可能な料金の範囲などの評価指標についての数値実験結果を紹介する。数値実験結果からシステム導入に意義が見込めることを示すとともに、シミュレーション実験を併せて実行することで、近似モデルの妥当性や待ち行列理論を用いて解析を行う意義についても説明する。

キーワード：待ち行列理論, 近似モデル, MaaS, シェアリングモビリティ, 道路渋滞

1. はじめに

近年、モビリティ産業においてシェアリングサービスが普及してきており、“Mobility as a Service (MaaS)”の一部としてシェアリングモビリティの導入が各地で進んでいる [1]。このシェアリングモビリティの概念を活かした新しいコンセプトの交通手段として、安東ら [1] はカーシェアリングとライドシェアリングの混合システムである Car/Ride-Share (CRS) を提案している。本稿では、CRS を待ち行列理論を用いてモデル化および解析し、そこから得られた洞察について紹介する。

カーシェアリングやライドシェアリングをはじめとするシェアリングモビリティに関しては、数理最適化理論によるアプローチが多く見受けられ、車両配置の最適化 [2]、利用客同士のマッチング最適化 [3] などの研究がなされている。しかし、これらの研究はあらかじめ交通需要が把握されているという前提のもとで最適化を図っているものがほとんどであり、遅延や渋滞などの交通の不確実性を考慮していない。

交通の不確実性を考慮したモデル化としては、待ち行列理論を用いてバイクシェアリングをモデル化した研究 [4]、一般的なデマンド型交通を確率論を用いてモ

デル化した研究 [5] などがなされている。ただし、これらの研究は複数のモビリティの共存をモデル内で表現しておらず、新しいモビリティを導入したことによる既存のモビリティへの影響を考慮していない。さらに、モビリティ導入による交通渋滞の発生、および金銭面での実行可能性についても議論していない。

以上を踏まえ、筆者らは、前述の CRS システムを既存のバス路線に導入したシナリオを、道路渋滞を考慮可能な形で、二つの待ち行列モデルを用いた近似モデルとして表現し、利用客の所要時間、金銭面での実行可能性などについて検討を行った。まず、2 節でこのシステムの仕組みと社会的意義を説明する。3 節では近似モデルの概要を紹介し、4 節では金銭面での実行可能性について議論する。最後に 5 節では、得られた数値実験結果について紹介するとともに、近似モデルの妥当性について言及する。

2. Car/Ride-Share システム

2.1 Car/Ride-Share の仕組み

Car/Ride-Share (CRS) とは、個人の所有車両を他者が運転する形でシェアリングしながら、さらにほかの利用者とライドシェアリングする枠組みのことと定義される [1]。具体的に、本研究では、“駅”と“大学、会社などが存在する地点（これ以降、記述を簡素にするため大学と呼称する）”との 2 地点間のバス路線に、バス会社自身がバスの本数を減らすかわりにこの CRS を導入するシナリオを図 1 のようにモデル化している。モデルに用いる主要なパラメータを表 1 のようにまとめる。

モデルの概要は以下のとおりである。駅のバス停に

なかむら あやね
筑波大学大学院システム情報工学研究群
〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
s2020431@s.tsukuba.ac.jp
ふんどっく とぅあん, あんどう ひろやす
筑波大学システム情報系
〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
tuan@sk.tsukuba.ac.jp
ando@sk.tsukuba.ac.jp

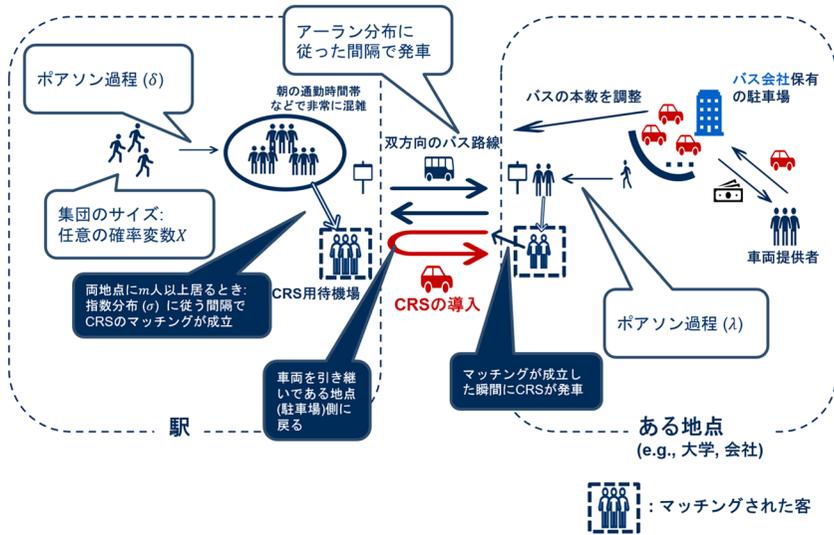


図 1 Car/Ride-Share (CRS) システムのイメージ図

は、解析の簡易化のためパラメータ δ のポアソン過程に従って集団が到着するものとし、集団のサイズは一般分布に従う確率変数 X で与えられると仮定する（電車から降りてきた客が一斉に到着する様子を想定している）。反対の大学のバス停にはパラメータ λ のポアソン過程に従って人が 1 人ずつ到着する。駅側は、朝の通勤ラッシュなどの影響で非常に混雑しており、バスに乗ることのできない利用客が大勢待ち行列に並んでいる状態であるとする。大学のバス停には人数制限は設けられていないが、駅側のバス停には最大でも K 人

の利用客しか存在することができず、新たな利用客の到着により K 人を超えてしまう場合は、その利用客はブロッキングされ、タクシーや徒歩などの別の交通手段で大学に向かうと仮定する。また、両地点から定員 l 人のバスがアーラン分布（パラメータ $q_{1(2)}$ の指数分布 $r_{1(2)}$ 個の和）に従った間隔で発車するものとする。

大学側にはバス会社が保有する駐車場が存在し、自身の車で訪れた車両提供者が、その車両を一定の金銭的インセンティブと引き換えに駐車場に提供する。この車両を用いて、利用客は 2 地点間を移動 (CRS) することができる。ただし、この CRS においては、バスと異なり運転者が必要となるため、両地点の人数に依存せず、いつでも実行可能というわけではない。さらに、一定時間内に車両を駐車場に返却しなくてはならないため、駅で車両の乗り継ぎをして再び大学側に戻るよう、2 地点間の交通需要のマッチングをする必要がある。よって、両地点に一定人数（車両の最小乗車人数 m ）以上の待ち人数がいるという条件を満たすときのみ両地点の利用客がマッチングされ、パラメータ σ の指数分布に従った間隔で CRS 車両を発生させるものとする。ただし、各地点でマッチングの対象となる上限人数は、CRS 車両の定員 n であるとする。具体的には、大学でマッチングされた利用客のグループが車両に乗り込み、その内の誰かひとりが運転をし、駅側に向かう。駅側でマッチングされた利用客のグループは、マッチングが成立した瞬間にバス停の待ち行列から離脱し、CRS 車両用の待機場場で車両を待つものとする。大学から発車した CRS 車両が駅に到着したら、駅

表 1 主要なパラメータの定義

パラメータ	定義
K (人)	駅のバス停に許容できる上限人数
δ (集団数/単位時間)	駅への集団の到着率
λ (人/単位時間)	大学への人の到着率
$q_{1(2)}, r_{1(2)}$	大学(駅)発のバスの発車間隔(アーラン分布)のパラメータ
σ (回数/単位時間)	CRS の発生率
l (人)	バスの定員
m (人)	CRS 車両の最小乗車人数
n (人)	CRS 車両の定員
M (車両数/km)	道路の最高トラフィック密度
SN (km/単位時間)	車両の上限速度
d (km)	2 地点間の道路の距離
β (車両数/単位時間)	Service Station のサービス率
$\epsilon_{us(su)}$ (車両数/単位時間)	大学から駅(駅から大学)方向の Service Station への一般車両の到着率

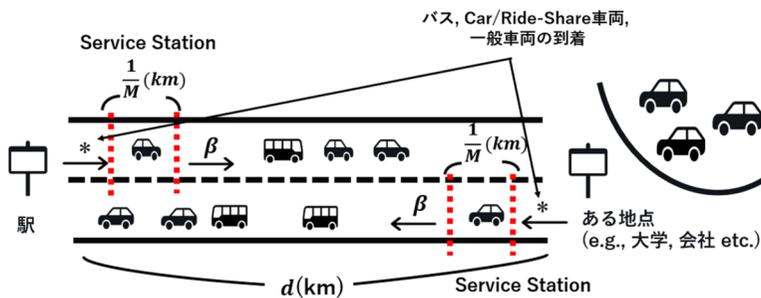


図2 道路のモデル化のイメージ図

で待っていた利用客のグループが車両を引き継ぎ、先ほど同様誰かひとりが運転をすることによって駐車場に戻っていくという形をとる。この一連の流れによって、両方向への交通需要を満たしながらも、車両が必ず駐車場に戻るという制約を満たすことができる。CRSの発生間隔が指数分布に従う理由としては、駅側の利用客とのマッチングが完了するまでの時間、さらには利用客のグループが駐車場内の車両が存在する地点まで到着し、実際に運転を開始するまでの時間にばらつきがあるであろうことが考えられる（本システムでは一度に一つのマッチングしか行われないことを仮定しているためである）。

2 地点間の道路での移動については、Vandaele et al. [6]の方法を参考に図2のようにモデル化した。この方法では、2地点間の道路の一部をService Stationと呼ばれる、サービス時間がパラメータ β の指数分布に従うシングルサーバの待ち行列モデルであるとみなしている。この指数分布のパラメータ β は β (車両数/単位時間) = SN (km/単位時間) $\cdot M$ (車両数/km)として計算することができる。Service Stationには、バスとCRS車両はもちろん、それ以外の車両（一般車両と定義する）もパラメータ $\epsilon_{us(su)}$ のポアソン過程に従って到着するものとする。この待ち行列モデルにおいて導出された平均系内時間、道路の最高トラフィック密度 M (M の逆数がService Stationの大きさであるとみなす)、および2地点間の道路の距離 d を用いて、車両の道路での相対速度を導出する（詳細は文献[7]を参照されたい）。この相対速度を用いると、車両が道路を移動するのにかかる移動時間を導出することができる。

また、その他の補足点として、今回のモデルにおいては議論を簡易にするため、車両の不足や、利用客の免許の有無、CRSに対する選好は考慮していない（利用客は先着順で、定員を超えない限りバスかCRS車両に乗り込む）。こういった点を考慮し、利用客や車両提

供者の行動をゲーム理論的な観点（たとえば、文献[8]などを参照されたい）からモデルに組み込むことは今後の大きな課題である。

2.2 Car/Ride-Share システムの社会的意義

CRSを導入するにあたっての主要な社会的意義は以下のとおりである [7, 9]。

まず、運営方針を適切に定めることによって、利用客においては、待ち時間や移動時間の減少に加え、より安価な料金での移動が叶う可能性がある。車両提供者においては、自身が車両を利用しない時間にその車両を貸し出すことにより、金銭的インセンティブを得ることができる。オペレーター（前述のとおり今回はバス会社と仮定）の立場においては、CRS導入により収入の増加が見込める可能性がある。さらに、近年バスドライバーの長時間労働問題が深刻化しているが、導入に際してバスの本数を減らすことで、同レベルの賃金を維持しつつ、ドライバーの労働時間を減らすことも可能になる。また、従来型のカーシェアリングにおいては、車両がある地点に偏在し、それをもとに戻す配回送という作業が発生するが、CRSシステムにおいては、利用客自身が車両の乗り継ぎを行い必ず駐車場に戻ってくるという制約を課しているため、オペレーター側にとって配回送のコストが全くかからない仕組みとなっている。

このように、CRSは、システム参加者（利用客、車両提供者、バス会社）全員にとってインセンティブをもたらす可能性のあるシステムであるといえる。実際にどのような条件のときに、どれほどのメリットがあるのかについては、（時間面、金銭面両方の観点から）数値実験結果を踏まえて5節にて議論する。

3. 近似モデルの考案

それでは、2.1節で解説したCRSシステムを、待ち行列理論を用いてどのように解析していくのが妥当なのだろうか？ システムにおけるイベントの発生間隔が

すべて相型分布に従う場合、GI/M/1 型マルコフ連鎖や M/G/1 型マルコフ連鎖などをはじめとする既存のマルコフ連鎖の理論を用いて、定常分布を導出することが可能である（相型分布は、連続時間吸収マルコフ連鎖が吸収されるまでの時間が従う確率分布であり、指数分布を特別な場合として含む。詳細は文献 [10]などを参照されたい）。しかし、本モデルでは、車両の道路での移動時間を、道路の距離を前述の相対速度で割り算することで導出しているため、一定分布となる。前述のとおり、このシステムにおいては CRS 車両は必ず駅で乗り継ぎを行い、大学へ戻っていく仕組みとなっている。そのため、駅から大学方向の Service Station への車両（バス、CRS 車両および一般車両）の正確な到着過程を把握するためには、大学から CRS 車両が発車したタイミング、および駅側に到達するまでにかかる移動時間をモデル内ですべて記憶させる必要がある。よって、本モデルは単純なマルコフ連鎖とはならず、このシステム全体をシンプルな形で解析することは困難である。

そこで打開策として、システム全体を二つの待ち行列モデル（車両発生モデルと道路モデル）に分解して解析する“近似モデル”を考案した。紙面の都合上、詳細な定式化は割愛するが、その概要は以下のとおりである。

3.1 車両発生モデル

一つ目のモデルは、両地点からどのようにバスが発車するか、また、大学からどのように CRS 車両が発車するかを説明し、それにより両地点における待ち人数を表現する“車両発生モデル”である。2.1 節で述べたとおり、CRS のマッチングが成立した瞬間に、マッチングの対象となった利用客は駅側の待ち行列から離脱するので、“両地点の待ち人数”にのみ着目するのであれば、道路での車両の移動時間を考慮しなくても良い。さらに、各時刻において、駅側のバス停から離脱し CRS 車両用の待機場で車両を待っている人数をモデルに勘案する必要はないことに注意されたい。

大学における待ち人数を $N(t)$ ($\in \{0, 1, 2, \dots\}$)、駅における待ち人数を $I(t)$ ($\in \{0, 1, 2, \dots, K\}$)、さらに、大学から駅方向、駅から大学方向のバスの発車間隔を表すアーラン分布の進行を示す変数をそれぞれ $R_1(t)$ ($\in \{0, 1, 2, \dots, r_1\}$)、 $R_2(t)$ ($\in \{0, 1, 2, \dots, r_2\}$) と定義すると、 $\{(N(t), I(t), R_1(t), R_2(t)); t \geq 0\}$ は 4 変数の連続時間マルコフ連鎖となる。このマルコフ連鎖は GI/M/1 型マルコフ連鎖となり、文献 [10] の方法を用いて安定条件の下で以下の定常状態確率 $\pi_{(j, \xi, \psi, \omega)}$

を導出することができる。

$$\pi_{(j, \xi, \psi, \omega)} = \lim_{t \rightarrow \infty} P(N(t) = j, I(t) = \xi, R_1(t) = \psi, R_2(t) = \omega).$$

安定条件は定常状態確率が存在するための必要十分条件であり、本モデルにおいては、大学側の利用客の待ち人数が無限大に発散しないための条件と同義となる。求めた定常状態確率を用いて、大学（駅）のそれぞれにおける利用客の平均待ち時間 $E[W_{u(s)}]$ 、単位時間あたりの CRS の期待発生回数 $E[C]$ などの性能評価指標を導出することができる。

3.2 道路モデル

二つ目のモデルは、道路での移動時間を算出するための“道路モデル”である。2.1 節で解説したとおり、道路の状態は、道路の一部を Service Station と呼ばれる待ち行列であると捉えることで表現可能だが、Service Station への正確な車両の到着過程を把握することは容易でない。よって、この道路モデルでは、近似的に Service Station への車両の到着がポアソン過程に従うものとする。大学から駅（駅から大学）方向の Service Station への車両の到着が従うポアソン過程のパラメータを $\alpha_{us(su)}$ とすると、 $\alpha_{us(su)}$ を車両発生モデルで導出した性能評価指標を用いて以下のように近似値として決定することができる。

$$\alpha_{us(su)} = E[C] + \frac{q_{1(2)}}{r_{1(2)}} + \epsilon_{us(su)}.$$

つまり、CRS とバスの単位時間あたりの期待発生回数をそのままパラメータの決定に用いている。

上記の近似によって、Service Station は M/M/1 待ち行列と呼ばれる基礎的なモデルとなり、容易に解析が可能となる。M/M/1 待ち行列の平均滞在時間および文献 [6] の手法を適用することで、車両の大学から駅（駅から大学）方向の道路での相対速度 $s_{us(su)}$ (km/単位時間) は以下のように導出される。

$$s_{us(su)} = \frac{1}{\frac{1}{\beta - \alpha_{us(su)}} \times M}.$$

ここで、上式において、 $1/(\beta - \alpha_{us(su)})$ は Service Station での平均滞在時間を表し、定義より Service Station の大きさは $1/M$ (図 2 を参照) となっていることから、Service Station の大きさを平均滞在時間で割り算することで、道路全体での相対速度を導出可能であることを理解できる。

また、2 地点間の距離 d (km) を用いて、大学から駅（駅から大学）方向への車両の平均移動時間 $E[R_{us(su)}]$

を以下のように導出することができる。

$$E[R_{us(su)}] = \frac{d}{s_{us(su)}}.$$

さらに、利用客の所要時間を待ち時間と道路での移動時間の合計であると定義すると、3.1節の結果を併せて利用することで、大学から駅方向、また駅から大学方向の利用客の平均所要時間 $E[A_{us}]$, $E[A_{su}]$ を以下のように表現することができる。

$$\begin{aligned} E[A_{us}] &= E[W_u] + E[R_{us}], \\ E[A_{su}] &= E[W_s] + E[R_{su}] + P_{CRS}E[R_{us}]. \end{aligned}$$

ただし、 P_{CRS} は駅側の利用客のうち CRS を利用する割合を表しており、車両発生モデルから導出することができる。駅側から CRS を利用する客にとっては、車両が大学側から到着するまで待つ時間が発生するため、 $E[A_{su}]$ の式のみ、第3項 ($P_{CRS}E[R_{us}]$) が必要となる。

4. 金銭面の議論

さて、ここで金銭面での CRS システムの実行可能性についても簡単に触れておきたい。今回は、バス会社自身が既存のバス路線に CRS を導入することを仮定しているが、公共交通機関という性質上、CRS を導入することによって利用客が移動の対価として支払う料金が上昇してしまうことは社会的に望ましくないと考えられる。よって、少なくとも CRS 導入後の料金は、導入以前の料金を下回る必要がある。一方、CRS 導入により、バス会社には車両提供者に付与するインセンティブやガソリン代などが発生する。CRS 導入による利用客の人数の増加を鑑みたとしても、あまりにも低い料金設定にすると、バス会社は CRS を導入したことによって不利益を被ることになってしまう。以上を踏まえると、車両提供者に金銭が付与されるという下で、利用客およびバス会社にメリットがある（以後、“実行可能” であると呼ぶ）CRS 導入後の料金はある一定の範囲内の値をとることがわかる。CRS 導入以前の料金を c 円、導入以後の料金を F 円とすると、実行可能な F は以下の二つの条件を満たす。

条件 1. $F < c$.

条件 2. $F \times T' + Z > c \times T$,

ただし、 $T =$ (CRS 導入以前の 1 時間あたりの利用客の総人数), $T' =$ (CRS 導入以後の 1 時間あたりの利用客の総人数), $Z =$ (バスの本数が減少したことにより浮いたガソリン代 - CRS 導入により発生したガソ

リン代 - 車両提供者に付与する金銭)。

条件 2 に登場する T , T' および Z は、3.1 節の車両発生モデルの解析結果を利用して導出することができる。特に、 T に関しては車両発生モデルにおいて $\sigma = 0$ とすることで導出した。CRS 導入により、それまで混雑のため駅でブロッキングされてしまい、ほかの交通手段を利用していった人が、バスもしくは CRS を利用できるようになり、システム全体の利用客の総人数が増加する ($T' > T$ が成り立つ) ことに注意されたい。

5. 数値実験

近似モデルを用いて導出した、利用客の平均所要時間および実行可能な料金の範囲についての数値実験結果を紹介する。さらに、システムを二つに分解せず、Service Station への車両の正確な到着率を反映させ、それを用いて相対速度を計算した（つまり、元のモデルを再現した）シミュレーション結果 (sim) についても併せて記載する。本節では、 $m = 2$, $n = 4$, $l = 30$, $K = 30$ および $d = 3$ と設定したうえで数値実験を行った。また、本数値実験は、単位時間を 1 時間と仮定して実行した。

5.1 利用客の平均所要時間

大学から駅方向の利用客の平均所要時間について、道路が空いているケース（図 3）、混んでいるケース（図 4）の 2 パターンに分けて結果を紹介する（Service Station への一般車両の到着率 ϵ_{us} を変化させることで、道路の混雑具合を変化させることができる）。横軸を CRS 発生率 σ とし、大学への人の到着率 λ をさまざまに変化させてプロットを行った。また、 $\delta = 300$, $q_{1(2)} = 10$, $r_{1(2)} = 1$, $SN = 60$ および $M = 200$ であるとする。

道路の混雑具合によって、グラフはかなり異なった傾向を見せている。図 3 より、道路が空いているときは、CRS を発生させればさせるほど (σ が大きいほど) 平均所要時間が短くなり、常に CRS の導入効果が見込まれることがわかる。一方、図 4 の道路が混んでいるケースにおいては、 λ の値によってグラフの形状が異なることが見てとれる。低い到着率 ($\lambda = 70, 140$) のときは、CRS の発生率が上がるほど、道路が激しく渋滞することにより平均所要時間が増加し、CRS 導入が逆効果になってしまっている。これは暗に、利用客が少なくかつ道路が混雑しているのであれば、わざわざ CRS を発生させるのではなく、バスが到着するのを待った方が、所要時間という観点からは利用客にとつ

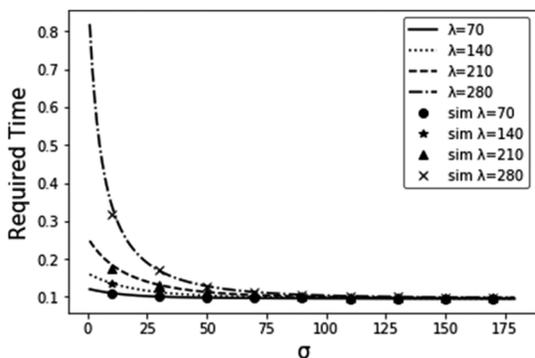


図3 道路が空いているケース ($\epsilon_{us} = 5,500$) の利用客の平均所要時間

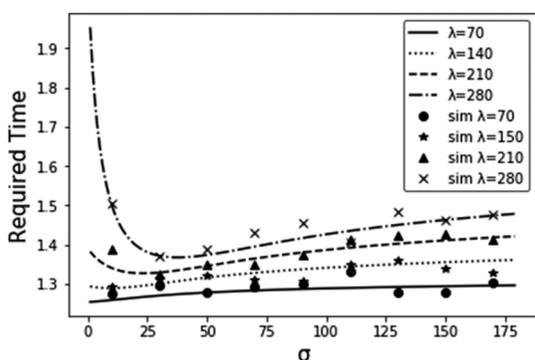


図4 道路が混んでいるケース ($\epsilon_{us} = 11,500$) の利用客の平均所要時間

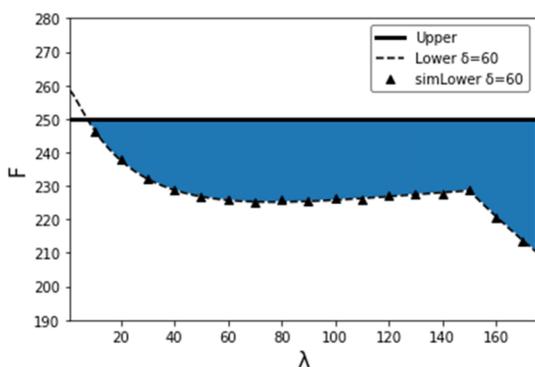


図5 実行可能な料金の範囲

て望ましいということを意味している。反対に、高い到着率 ($\lambda = 210, 280$) のときは、グラフは凸形状である。つまり、少量であれば CRS は効果的であるが、発生させすぎるとやはり道路渋滞による移動時間の増加の影響が大きくなってしまふ。これは、利用客が多く、道路が混雑している際には平均所要時間を最小化する最適な発生率 σ が存在するとも解釈することがで

きる。

1 節で述べたとおり、シェアリングモビリティのモデル化についてはさまざまな研究がなされているが、利用客の不確実性や道路渋滞について考慮していないものが多い。しかし、今回の数値実験結果から、人の到着率や道路の混雑具合によって、新規モビリティの導入効果が大きく異なることがわかったことは興味深い。実際に新規モビリティの導入を検討する際にも、こういった観点をモデルに組み込み、慎重に議論する必要があるということが示唆される。

5.2 実行可能な料金の範囲

4 節で議論した実行可能な料金の範囲について、CRS 導入以前の料金 c を 250 円としたときの数値実験結果 (図 5) を紹介する。また、バスの発車間隔に関するパラメータ q_1, r_1 を適切に変化させることで、バス会社が大学発のバスの単位時間あたりの発車回数を 5 本から 4.5 本に減らしたかわりに CRS を導入するシナリオを想定して、数値実験を行っている (駅発のバスについては本数を変化させていない)。その他のパラメータとしては、車両提供者全体に単位時間あたりに付与する金銭を簡易的に 1,000 円とし、文献 [11] のデータを参考に、バスが片道を走行するのにかかるガソリン代および CRS が 2 地点を往復するのにかかるガソリン代を 95 円と設定した。

横軸 λ に対して、条件 1 (Upper) と条件 2 (Lower) で囲まれた着色領域が実行可能な料金 F 円となる。条件 1 については、 $c = 250$ と設定しているため、 λ の大きさにかかわらず一定の値をとっている。一方、条件 2 は非常に興味深い挙動をとっている。まず、 λ が極めて小さな値をとる、つまり利用客が少ないときには、バス会社にとってわざわざコストをかけて CRS を導入するメリットがなく、実行可能な料金の範囲が存在しない。そして、 λ が増加するにあたって、CRS が発生しやすくなり、バス会社にとってコストを上回る利益が得られるようになり、実行可能な料金の範囲が発生しはじめる。しかし、反対側の駅への人の到着率 δ は固定しているため、横軸 λ ばかりを増加させても結果的に発生する CRS の回数はほとんど増加しなくなる。よって、 λ がある一定 (この例だとおよそ 80) 以上になると、CRS 導入による収入の増分 (バスのみの状態からの増分) は減少していく。よって条件 2 を表す曲線が徐々に増加していき、より高い料金でないこと CRS が実行可能にならないことがわかる。さらに、 $\lambda = 150$ の点を過ぎると、条件 2 を表す曲線が急激に下降している。実は、 $\lambda = 150$ は CRS 導入前にバ

スのみでサービス可能な上限人数（バスの定員と CRS 導入前のバスの期待発車率の積）を表している。つまり、 λ が 150 を超えると、導入前にバスを利用することができなかつた人が、CRS 導入により、バスもしくは CRS を利用可能になり、バス会社にとって、利用客の総人数自体が増加する。よって、より安価な料金でも CRS は実行可能となる。このように、人の到着率によって、金銭面においても実行可能性が大きくなることから、数値実験結果により明らかになった。

5.3 近似モデルの妥当性

最後に、近似モデルの妥当性について少し補足をする。図 3-5 を見てわかるとおり、近似モデルの解析結果と元のモデルを再現したシミュレーションの結果はおおむね一致しており、近似モデルは上手くシステム全体を説明できているといえる。

考えられる理由として、今回はバス・CRS の到着過程について近似を用いたが、一般車両も含めた全車両からみるとその割合はそこまで大きいものではないことが挙げられる。また、バス・CRS の単位時間あたりの発生回数の期待値は車両発生モデルのみを用いて導出可能であり、この期待値さえわかれば、両者の正確な到着過程を把握できなくても、システム全体をおおむね説明可能であるとも解釈することができる。さらに、3.1 節で少し触れたように、本来のシステムの状態を正確に説明するために必要な、各時刻において駅の CRS 車両用の待機場で車両を待つ人数をモデル内で省略し、モデルに必要な変数の数を削減しても、結果にはあまり影響を及ぼさないことも明らかになった。これは、最終的に知りたい性能評価指標（利用客の平均所要時間）を求めるには、前述の変数をわざわざモデル内で記録させなくても、駅から CRS を利用する客がバス停の待ち行列から離脱するタイミングおよび道路での平均移動時間を把握できれば十分だからである（3 節で述べたとおり、この二つは車両発生モデルと道路モデルから導出可能である）。

このように、システムを構成するすべての要素や条件を完璧にモデルに反映させなくても、本質的な情報を失わないように留意しながら複雑なシステムをより簡素なシステムに分解して考えることで、評価に必要な指標の値を簡単かつおおむね正確に、また比較的小さい計算コストで把握できる。待ち行列理論を用いて解析を行うことの一つの意義として、このようなメリットが挙げられるのではないだろうか。

6. おわりに

本稿では、待ち行列理論を用いて、Car/Ride-Share (CRS) システムを近似モデルとして解析し、得られた数値実験結果について紹介した。得られた結果から、CRS は利用客の所要時間・金銭面の観点から導入可能性を見込めることを示した。ただし、道路の渋滞状況や利用客の到着率などの条件次第では、CRS 導入が不利益を生むケースがあることも明らかになった。詳細な内容については文献 [7] を参照していただければ幸いである。

今後の課題としては、2.1 節で触れた参加者の心理面や戦略的な行動の考慮、複数地点間へのモデルの拡張などが考えられる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費番号 19K1298、18K18006、および JST MIRAI No. JPMJMI19B1 の支援を受けて実施している。また、本研究は筑波大学とトヨタ自動車の共同研究として実施された。

最後に、本稿に目を通し、貴重なご意見をくださった佐久間大先生、河西憲一先生に心より感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] 安東弘泰, 高原勇, 大澤義明, “大学を拠点とするモビリティサービス,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **64**, pp. 447–452, 2019.
- [2] G. Correia and A. Antunes, “Optimization approach to depot location and trip selection in one-way car-sharing systems,” *Transportation Research Part E*, **48**, pp. 233–247, 2012.
- [3] N. Agatz, A. Erera, M. Savelsbergh and X. Wang, “Optimization for dynamic ride-sharing: A review,” *European Journal of Operational Research*, **223**, pp. 295–303, 2012.
- [4] S. Tao and J. Pender, “A stochastic analysis of bike sharing systems,” available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3026324>, 2017.
- [5] C. F. Daganzo and Y. Ouyang, “A general model of demand-responsive transportation services: From taxi to ride sharing to dial-a-ride,” *Transportation Research Part B*, **126**, pp. 213–224, 2019.
- [6] N. Vandaele, T. Van Woensel and A. Verbruggen, “A queueing based traffic flow model,” *Transportation Research Part D*, **5**, pp. 121–135, 2000.
- [7] A. Nakamura, T. Phung-Duc and H. Ando, “A stochastic analysis and price mechanism of car/ride-share system considering road congestion,” to be submitted.
- [8] S. Banerjee, C. Riquelme and R. Johari, “Pricing in ride-share platforms: A queueing-theoretic approach,” available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2568258>, 2015.
- [9] A. Nakamura, T. Phung-Duc and H. Ando, “Queue-

ing analysis for a mixed model of carsharing and ridesharing,” *ASMTA2019, Lecture Notes in Computer Science*, **12023**, pp. 42–56, 2020.

[10] 牧本直樹, 『待ち行列アルゴリズム—行列解析アプロー

チー』, 朝倉書店, 2001.

[11] 国土交通省, 「自動車:自動車燃費一覧」, http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000039.html (2019年2月3日閲覧)