

ライドシェアと公共交通の 最適分担関係に関する研究

山崎 太喜¹・瀬木 俊輔²

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: yamasaki.taiki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町 1)

E-mail: segi@people.kobe-u.ac.jp

近年、ライドシェア車両が渋滞を引き起こす事例が確認されており、ライドシェアと公共交通の適切な分担が求められている。そこで本研究では、渋滞の発生の有無やネットワークの条件を変えた場合のライドシェアと公共交通の最適分担比率の変化について分析を行う。駅から遠い地点と近い地点が存在するような格子上のネットワークを仮定し、道路リンクにおいて設定した交通容量を上回った場合に渋滞が発生する動的モデルでシミュレーションを行う。最適分担比率の分析により、ライドシェア事業の抑制や促進に関する交通政策を行う上で渋滞を考慮することの重要性を明らかにする。さらに、公共交通の利便性の差による最適分担比率の違いや、渋滞の深刻化に伴うライドシェアによる移動距離の変化を捉えることで、最適状態についての考察を行う。

Key Words: *ridesharing, public transportation, optimal modal share, traffic congestion, grid network*

1. はじめに

近年モータリゼーションの影響により、特に都心部では交通渋滞や大気汚染などが社会に悪影響を及ぼしている。それらの問題の解決策の一つとして近年注目されているのがライドシェアである。ライドシェアとは、自家用車の所有者が自家用車に客を乗せて運転することであり、アメリカを中心に多くの国で利用可能となっている。ライドシェアの普及の利点として、旅行者の移動の利便性向上が挙げられる。また、元々自家用車で移動していた人がライドシェアを利用することによって相乗りによる移動を増やすことができた場合、道路を通行する自家用車を減らすことができ交通渋滞や大気汚染の軽減に貢献できる。Ziru et al. (2016)¹⁾による研究においても、Uberの参入がアメリカの都市部における渋滞の減少と二酸化炭素排出量の削減に貢献すると結論づけられている。

ライドシェアが渋滞の軽減に貢献すると考えられている一方で、むしろ渋滞の悪化を招く場合もある。サンフランシスコのライドシェア利用者を対象とした調査²⁾では、ライドシェアサービスが利用できなかった場合どうしたかという質問に対して、39%の人がタクシー、33%の人がバスまたは鉄道、6%の人が自分の車を利用する

と答えた。この調査の結果は元々公共交通で移動していた人がライドシェアを利用する場合があることを示唆する。また、国や州の法律によって異なるが一定の条件を満たせばライドシェア事業に容易に参加できることもあり、都市内のライドシェアの車両数は増えやすいシステムとなっている。ニューヨークではライドシェア車両の増加が一因となる深刻な渋滞が実際に発生しており、2018年にライドシェア台数の制限を、2019年にライドシェアやタクシーの運賃に対する混雑料金の上乗せを決定した。ライドシェアが世界中に広まりつつある中で、ニューヨークと同様の規制が他国でも行われる可能性がある。

以上のようにライドシェアが渋滞の一因となっている事例がある。ライドシェアの利用者数が増えるほど渋滞の深刻化により旅行時間が増加するが、ライドシェアの利用者全員が公共交通を利用するのは最適ではない。ライドシェアには Door-to-Door の移動ができるメリットがあり、公共交通の場合は出発地から駅や停留所、駅や停留所から目的地まで徒歩が必要となる。そのため、公共交通の分担比率が多い状態は人々の徒歩時間の増加を招き、時間損失の増加に至る。従って、ライドシェアと公共交通には最適な分担比率が存在すると推測できる。

以上の背景を踏まえ、ライドシェアと公共交通の最適分担比率に関して、渋滞の発生の有無やネットワーク等の条件を変えた場合の変化を確認することを本研究の目的とする。最適分担比率に関して、駅から近い場所では公共交通の比率が高くなり、駅から遠い場所ではライドシェアの比率が高くなるため、ライドシェアと公共交通の最適分担比率を正確に捉えるためにはネットワーク上に公共交通の利用に便利な場所と不便な場所を設ける必要がある。また、マッチングに伴うライドシェアの動きを正確に表現するためにも、本研究では面的な広がりをもつ都市において車両や人々がどのような動きをするのかについてのシミュレーションを行う。

2. 既存研究のレビューと本研究の位置づけ

(1) 既存研究のレビュー

ライドシェアのマッチングに注目した既存研究として、Niels et al. (2011)⁹、長ら(2018)⁹、Long et al. (2018)⁹が挙げられる。

Niels et al. (2011)⁹は、運転手と客をリアルタイムで最適にマッチングするアルゴリズムの研究があまり行われてこなかったことに着目し、運転手と客が継続的に参入、離脱する新しい実用的な動的ライドシェアモデルの作成を行った。作成したモデルをアトランタのネットワークに適用することで、ライドシェア参加者のマッチング確率が向上すること、移動コストが削減することを確認した。長ら(2018)⁹は、相乗りにおいて乗り換え効果を検討した研究や、運転手の起終点と利用者の起終点の4点に注目した研究がないことに着目し、マッチングの可能性や乗り換え効果について考察を行った。運転手は利用者の送迎を行わないという仮定のもと、放射状の単純なネットワークを構築して平均マッチング待ち回数の解析を行ったところ、乗り換えが格段に効果的であることを明らかにした。Long et al.(2018)⁹は、確率分布により移動時間を決定し早着と延着の可能性を考慮することで、ライドシェアのマッチングの際の移動時間の不確実性について研究を行った。一般化費用の削減量とマッチング回数の最大化を行うという条件のもとでライドシェアのマッチングを行ったところ、移動時間の不確実性を考慮した場合に一般化費用の削減量とマッチング回数の最大値が変化することを明らかにした。しかしながら、これらの研究では交通量の増加により渋滞が生じる状況をシミュレーションできておらず、渋滞を考慮したマッチングモデルの構築が求められている。

次に、公共交通とライドシェアに関する既存研究の整理を行う。公共交通とライドシェアに関する既存研究として、Mitja et al. (2018)⁹、Meng et al. (2018)⁷、Kyunghee et al.

(2022)⁹が挙げられる。

Mitja et al. (2018)⁹は、ライドシェアシステムと公共交通機関の一体化による利点の検討を行った。放射状の単純な公共交通ネットワークを仮定し、旅行コストを最小化するようにシミュレーションを行ったところ、ライドシェアで公共交通の駅に乗り入れた後にパークアンドライドを行うことでライドシェアのマッチング回数と公共交通の利用者数が増加することを明らかにした。Meng et al. (2018)⁷は、2つのノードを幹線道路リンク、脇道リンク、公共交通リンクで結んだ単純なネットワークでの交通手段の選択モデルを提案し、様々なパラメータを変化させたときの交通手段の変化を確認した。その結果、ライドシェア利用者と運転手に対する報酬の増額および幹線道路を利用する一人乗り車両への通行料の増額により、公共交通やライドシェアなどの環境に優しい交通手段を選択する人が増加し渋滞緩和が可能になること、車両の定員が増えることが車両を共有する動機付けになることを明らかにした。また、この研究におけるモデルでは出発時間の選択を考慮していないことが一つの課題として挙げられている。Kyunghee et al. (2022)⁹は、ライドシェアサービスが徒歩や自転車で移動する人に与える影響を検証した研究がないことに着目し、ライドシェアサービスが自家用車利用者、公共交通利用者、歩行者の様々な旅行者層に与える影響を実証的に検証した。その結果、Uberが公共交通機関に与える影響は公共交通利用者と自家用車利用者の割合に依存すること、公共交通の利用者や歩行者の割合が高いコンパクトな都市ではUberの参入により公共交通の需要が低下することで渋滞が悪化すること、公共交通とライドシェアには代替性があることを明らかにした。しかしながら、これらの研究は線分や放射状などの単純なネットワークになっていることや、渋滞が考慮されていない場合があることが課題となっている。

最後に、ライドシェアと渋滞に関する既存研究の整理を行う。ライドシェアと渋滞に関する既存研究として、Xuegang et al. (2019)⁹、Yuanyuan et al. (2020)¹⁰、Caio et al. (2021)¹¹が挙げられる。

Xuegang et al. (2019)⁹は、オンライン配車サービスの普及と客の送迎時のような余分な車両走行の関係、およびそれが渋滞に及ぼす影響を理解するための数学モデルを開発した。作成した数学モデルをスーフォールズのネットワークに適用した結果、通勤時のように一定の方向への車両の通行が多い場合はライドシェアの余分な走行が増えるため、ライドシェアの利用によって車両走行距離が大幅に増加すること、一方で車両の通行が両方向へ同程度ある場合はライドシェアの余分な走行が大幅に減少することを明らかにした。Yuanyuan et al. (2020)¹⁰は、長期的に安定した渋滞分布を予測するためのモデルの開発を行った。数値計算の結果、全体の渋滞を緩和するのにラ

ライドシェアは有効であり、中心地に入る通勤客はライドシェアを利用するのがより良いことを示した。Caio et al. (2021)¹¹⁾は、様々な要素が渋滞に与える影響を検証した。ライドシェア車両のサイズの拡大によって待ち時間は減少するが混雑が悪化することや、客が降車後に駐車場に入るなど客待ちの巡回車両が減少することで渋滞が緩和することを明らかにした。また、客の相乗り意欲の向上によって待ち時間とライドシェアによる移動時間の最小化が可能であることを示した。これらの研究ではライドシェアと渋滞の関係を明らかにしているが、公共交通の存在を考慮した検討は行われていない。

(2) 本研究の位置づけ

既存研究を整理すると、公共交通とライドシェアの分担関係に関して渋滞を考慮して検討されている研究は少ない。また、ネットワークに関しては、線分や放射状など非常に単純な形状を仮定しているものが多い。

そこで本研究では、駅から遠い地点と近い地点が存在するような現実に近い格子状のネットワークを仮定し、渋滞の発生の有無でライドシェアと公共交通の最適分担比率がどのように変化するかを明らかにする。また、道路リンクにおいて設定した交通容量を上回った場合に渋滞が発生する動的モデルでシミュレーションを行う。

3. モデルの説明

本研究では、ライドシェアと公共交通の最適分担比率の変化を確認するにあたり、シミュレーションモデルを用いて分析を行う。そこで、本章ではモデルのネットワークやマッチング等の様々な仮定について述べる。

(1) ネットワークの仮定

本節では、ライドシェアと公共交通の最適分担比率の変化を明らかにする上で用いるネットワークの仮定について説明する。

n^{row} 行 n^{col} 列の格子状に $n^{row} \times n^{col}$ 個のノードが配置されている都市を考える。但し、 n^{row} と n^{col} はともに 3 以上の奇数である。隣り合うすべてのノード間は双方向に移動できる道路リンクと徒歩リンクにより接続されている。また、隣り合う一部のノード間は双方向に移動できる地下鉄リンクにより接続されている。リンクの種類に関わらず、1 リンクの長さは l [km] であり、斜め方向のリンクは存在しない。地下鉄リンクは格子状の都市の中心を通るように配置されており、 $(n^{row} + 1)/2$ 行のすべてのノードを結ぶ路線と、 $(n^{col} + 1)/2$ 列のすべてのノードを結ぶ路線が存在する。都市の中心を通るこれら 2 路線の地下鉄リンクに加えて、 $n^{interval}$ 行おきに行

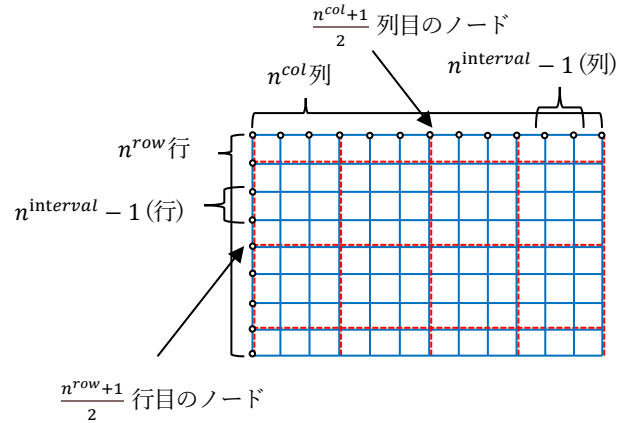


図-1 モデルのネットワークの例

のすべてのノードを結ぶ路線と、 $n^{interval}$ 列おきに列のすべてのノードを結ぶ路線が存在する。従って、行方向のノードを結ぶ路線は、 $(n^{row} + 1)/2 \pm kn^{interval}$ ($0 \leq k < n^{row}/2n^{interval}$) 行に存在し、列方向のノードを結ぶ路線は、 $(n^{col} + 1)/2 \pm kn^{interval}$ ($0 \leq k < n^{col}/2n^{interval}$) 列に存在する。但し、 k は整数である。以上を踏まえると、ネットワークの例は図-1 のようになる。但し、実線は道路リンク・徒歩リンク、点線は地下鉄リンクであり、 $n^{row} = 9$ 、 $n^{col} = 13$ 、 $n^{interval} = 3$ の場合のネットワークの例である。

すべての道路リンクの自由流旅行時間と交通容量は同一であり、自由流旅行時間は 1 リンクあたり $\tau^{vehicle}$ [min]、交通容量は Z [台/min] である。すべての徒歩リンクの旅行時間は同一であり、1 リンクあたり τ^{walk} [min] である。すべての地下鉄リンクの旅行時間は同一であり、1 リンクあたり τ^{public} [min] である。また、徒歩リンクと地下鉄リンクの交通容量は無限大であり混雑は発生しない。

一方で、道路リンクは交通容量が設定されており、自家用車とライドシェア車両の通行により渋滞が発生する。道路リンクは渋滞の生じない自由流走行区間と、渋滞の生じる原因となるボトルネックから構成される。道路リンクの交通量に関わらず、車は自由流走行区間を $\tau^{vehicle}$ [min] で通過できる。ボトルネックは車が 1 台通過するとその直後から $1/Z$ [min] の間、通過できなくなる。ボトルネックを通過できない車は待ち行列を形成し、直前の車がボトルネックを通過してから $1/Z$ [min] が経過すると、1 台ずつボトルネックを通過していく。連続するすべての車の到着間隔が $1/Z$ [min] を上回っている場合は渋滞が発生しない。ボトルネックにおける待ち行列は point-queue として表現し、待ち行列の長さは自由流走行区間に影響を与えないとする。

以上をまとめると、ネットワークに関するインプット

データは、ネットワークの行数 n^{row} 、ネットワークの列数 n^{col} 、1リンクの長さ l 、地下鉄リンクの間隔 $n^{interval}$ 、道路リンクの1リンクあたりの自由流旅行時間 $\tau^{vehicle}$ 、道路リンクの交通容量 Z 、徒歩リンクの1リンクあたりの旅行時間 τ^{walk} 、地下鉄リンクの1リンクあたりの旅行時間 τ^{public} となる。

(2) 走行コストと社会的総費用の定義

本研究では社会的総費用を最小化するようにライドシェアと公共交通の分担比率を決定する。また、本モデルにおける移動手段には、自家用車、地下鉄・徒歩、ライドシェアの3種類が存在する。そこで、本節では移動手段別の走行コストと社会的総費用の定義を行う。

最初に、自家用車の走行コストの定義を行う。自家用車の走行には燃料が必要であるから、固定費を除くと自家用車の走行コストは自家用車の走行距離に比例すると考えられる。比例定数を $\beta^{vehicle}$ [\$(台 \cdot km)\$]、全自家用車の走行距離の和を $L^{private}$ [台・km]とすると、自家用車の総走行コスト $C^{private}$ [\$]は、

$$C^{private} = \beta^{vehicle} \cdot L^{private} \quad (1)$$

と定義できる。

次に、地下鉄の走行コストの定義を行う。地下鉄は利用者が増えると運行本数を増やす必要があるため、固定費を除くと地下鉄の走行コストは地下鉄の利用者数に比例すると考えられる。比例定数を β^{public} [\$(人 \cdot km)\$]、全地下鉄利用者の走行距離の和を L^{public} [人・km]とすると、地下鉄の総走行コスト C^{public} [\$]は、

$$C^{public} = \beta^{public} \cdot L^{public} \quad (2)$$

と定義できる。

最後に、ライドシェアの走行コストの定義を行う。自家用車同様に、ライドシェアの走行距離の増加に伴ってライドシェアの走行コストも増加する。また、ライドシェアの運転手は走行時間とマッチング待ちの時間を投入してサービスを提供しており、その時間の機会費用は社会的費用になる。そのため、ライドシェアの場合は走行コストではなく、運用コストと呼ぶことにする。運転手を含むライドシェアの車両の時間価値を $\alpha^{rideshare}$ [\$/min]、全ライドシェア車両の存在時間の和を $T^{rideshare}$ [min]、全ライドシェア車両の走行距離の和を $L^{rideshare}$ [台・km]とすると、ライドシェアの総運用コスト $C^{rideshare}$ [\$]は

$$C^{rideshare} = \alpha^{rideshare} \cdot T^{rideshare} + \beta^{vehicle} \cdot L^{rideshare} \quad (3)$$

と定義できる。

以上より、社会的総費用の定義を行う。社会的総費用は自家用車、地下鉄の走行コスト、ライドシェア運用コストの和に旅行者の時間損失の項を加えた値になるから、旅行者の時間価値を α [\$/min]、全旅行者の旅行時間の和を T [min]とすると、式(1)～式(3)より社会的総費用 $C^{general}$ [\$]は、

$$C^{general} = \alpha \cdot T + \beta^{vehicle} \cdot L^{private} + \beta^{public} \cdot L^{public} + \alpha^{rideshare} \cdot T^{rideshare} + \beta^{vehicle} \cdot L^{rideshare} \quad (4)$$

と定義できる。モデル上では、1分間あたりの社会的総費用が最小となるときを最適な状態とする。また、社会的総費用を算出するにあたり必要なインプットデータは、車両1台が1km走行するのに必要な費用 $\beta^{vehicle}$ 、地下鉄で1人が1km移動するのに必要な費用 β^{public} 、運転手を含むライドシェアの車両の時間価値 $\alpha^{rideshare}$ 、旅行者の時間価値 α となる。本研究では、 $\beta^{vehicle} = 0.1$ 、 $\beta^{public} = 0.05$ 、 $\alpha^{rideshare} = 0.4$ 、 $\alpha = 19/60$ と設定している。

(3) 移動手段の選択

旅行者はライドシェアや自家用車、地下鉄・徒歩の中から移動手段を選び、都市内の目的地まで移動する。そこで、本節では旅行者がどのように移動手段を選ぶのかについて説明を行う。

都市内の旅行者は、強度が λ [人/min]のポアソン過程に従い発生する。旅行者の出発地と目的地は都市内のいずれかのノードであり、各ノードが出発地もしくは目的地になる確率はすべてのノードにおいて等しい。但し、目的地と出発地が同一のノードになることはない。発生した旅行者は、確率 $p^{private}$ で自家用車を、確率 $1 - p^{private}$ でライドシェアもしくは地下鉄・徒歩を利用する。本研究において、特に記述がない場合は $p^{private} = 0.5$ と設定しているが、これは旅行を行う半数の人が自家用車を持っており、自家用車を持っている人は必ず自家用車で旅行することを仮定している。

ライドシェアもしくは地下鉄・徒歩を利用する利用者は、地下鉄・徒歩による移動にかかる私的限界費用 c^{public} とライドシェアによる移動にかかる私的限界費用 $c^{rideshare}$ を比較し、 $c^{public} < c^{rideshare}$ の場合は地下鉄・徒歩を選択し、 $c^{public} > c^{rideshare}$ の場合はライドシェアを選択する。本研究では、これらの私的限界費用が社会的限界費用に一致するような理想的な政策が実施されており、社会的総費用を最小化するように旅行者がライドシェアと地下鉄・徒歩の選択を行う状況を想定する。

地下鉄・徒歩による移動時間を t^{public} [min]、地下鉄を

利用する移動距離を l^{public} [km] とすると、地下鉄・徒歩による移動にかかる私的限界費用 c^{public} [\$] は、

$$c^{public} = \alpha \cdot t^{public} + \beta^{public} \cdot l^{public} \quad (5)$$

と表せる。 β^{public} は地下鉄の料金が運行の限界費用に等しくなるように決定されている。移動経路に関しては、私的限界費用が最小となるような経路を選択するため、出発地と目的地の距離が近い際には、徒歩のみで移動する場合もある。また、地下鉄リンクと徒歩リンクでは混雑は発生しないため、地下鉄の料金が運行の限界費用に等しければ、私的限界費用と社会的限界費用は等しくなる。一方で、ライドシェアによる移動距離を $l^{rideshare}$ [min] とすると、ライドシェアによる移動にかかる私的限界費用 $c^{rideshare}$ [\$] は

$$c^{rideshare} = a + b \cdot l^{rideshare} \quad (6)$$

と定義する。 a と b は未知の定数であり、社会的総費用最小化問題における最適化の対象となる。社会的総費用を最小化するように a と b を設定することにより、 $c^{rideshare}$ はライドシェアによる移動にかかる社会的限界費用に一致する。これを現実的に考えると、ライドシェアの料金を最適に規制することに相当する。以上のように旅行者は移動手段の選択を行い、ライドシェアと公共交通の最適分担比率が決定する。但し、 a 、 b は本来 OD ペアにより異なる値をとりうるが、本研究では簡単のためすべての OD ペアに共通の a 、 b を用いている。

自家用車とライドシェアの車両は、移動距離が最小になるように道路リンクを移動して目的地へ向かう。ノードは格子状に配置されているため移動距離が最小になる経路は複数存在する。この経路は次のように決定される。旅行者は移動中にノードに到着したとき、次に選択可能なリンクが 2 本存在する。このとき、2 本のリンクのうち、現在存在する車両数が少ない方のリンクが選択される。下から i 行目、左から j 列目のノードを (i, j) とすると、例えばノード(1,1)からノード(2,2)に移動するとき、旅行者がノード(1,1)にいるときの上へのリンクと右へのリンクに存在する車両数を比較し、少ない方のリンクを選択する。

(4) マッチングの条件

最後にライドシェアと旅行者のマッチングについての説明を行う。ライドシェアを利用する旅行者は、車両の予約を入れて予約待ちの状態となる。各ノードには、予約待ち状態の旅行者の待ち行列が形成される。この待ち行列は物理的な行列ではなくライドシェアのシステム上の待ち行列であり、旅行者とライドシェア車両とのマッ

チングが成立した時点で、旅行者は待ち行列から抜ける。したがって、旅行者が待ち行列から抜けた時点で、ライドシェア車両が旅行者と同じノードに存在する場合はすぐにライドシェア車両は旅行者を乗せて目的地に向かうが、ライドシェア車両が旅行者と異なるノードにいる場合はライドシェア車両が送迎を開始する。

都市内には $N^{rideshare}$ [台] のライドシェア車両が存在し、 $N^{rideshare}$ は最適化の対象となる。ライドシェア車両は割り当てられた旅行者の出発地に向かい、旅行者を乗せた後に旅行者の目的地に向かい、旅行者を降ろすという動作を繰り返す。旅行者を降ろした後、ライドシェア車両の現在地から最も近いノードの待ち行列の先頭にいる旅行者を、次の旅行者として選択する。ライドシェア車両の現在地から最も近いノードの待ち行列が複数存在する場合は、待ち行列の長さが最長の待ち行列が選択される。待ち行列の長さが同じ待ち行列が複数ある場合は、その中からランダムに選択される。ライドシェア車両が旅行者を降ろしたときに、予約待ちの旅行者が都市内に 1 人もいない場合には、車両は現在地ノードで待機状態となり、各ノードには待機状態の車両の待ち行列が形成される。

都市内に待機状態のライドシェア車両が存在するときに、新たにライドシェア車両の予約を入れる旅行者が現れた場合には、待機状態の車両がその旅行者に割り当てられる。待機状態の車両が複数存在する場合には、旅行者の現在地から最も近いノードの待ち行列の先頭にいる車両が割り当てられる。旅行者の現在地から最も近いノードの待ち行列が複数存在する場合は、待ち行列の長さが最長の待ち行列が選択される。

4. ライドシェア台数・利用者数と社会的総費用の分析

(1) 分析の条件

本節では、ライドシェア台数・利用者数が変化したときの旅行者 1 人あたりの社会的総費用の変化を確認し、その変化の様子が渋滞の発生の有無でどのように変わるのかを明らかにする。その際、3 章で述べたモデルの条件と多少異なる設定の下で分析を行う。本節ではライドシェアと公共交通の分担比率およびライドシェア台数を定数として与えてシミュレーションを行い、社会的総費用の最小化は行わない。発生した旅行者は、確率 $p^{private}$ で自家用車を、確率 $p^{rideshare}$ でライドシェアを、確率 p^{public} で地下鉄を、移動手段として選択し、 $p^{private} + p^{rideshare} + p^{public} = 1$ となる。以上の条件下で分析を行うことで、ネットワークや移動手段についての条件を与えた上での移動手段別の平均移動時間や平

均走行コスト，旅行者 1 人あたりの社会的総費用等を把握することができる。

モデルにおけるネットワークは， $n^{row} = 3$ ， $n^{col} = 3$ ， $n^{interval} = 1$ ， $\tau^{vehicle} = 5$ ， $l = 2.5$ ， $\tau^{public} = 5$ ， $\tau^{walk} = 15$ と設定する．また， $p^{private} = 1/3$ ， $p^{rideshare} = 1/3$ ， $p^{public} = 1/3$ とし，1 分あたりのライドシェア利用者数の期待値は $p^{rideshare} \times \lambda$ [人] であるから，ライドシェア利用者数は λ に依存する．従って，ライドシェア利用者数の変化は λ の変化で表現できる．

以上より，ライドシェア台数とライドシェア利用者数を変化させるため，表-1 のように $N^{rideshare}$ と λ を設定する．ここで， $N^{rideshare}$ と λ は比例関係になるように設定している．

表-1 $N^{rideshare}$ と λ の設定

$N^{rideshare}$	15	30	45	60	75
λ	3	6	9	12	15

$N^{rideshare}$	90	105	120	135
λ	18	21	24	27

(2) 分析結果と考察

$Z = \infty$ に設定された渋滞が発生しない場合と， $Z = 5/3$ に設定された渋滞が発生する場合において分析を行った．表-1 のそれぞれの条件に対して，1 人あたりの社会的総費用の変化をグラフにしたものが図-2，待ち時間の変化をグラフにしたものが図-3 である．但し，図-2，3 における 1 人あたりの社会的総費用と待ち時間は 600 分のシミュレーション結果の 5 回の平均である．また，待ち時間とは客がライドシェアを予約してから客がいるノードにライドシェアが到着するまでの時間，すなわち客が予約待ち状態の旅行者の待ち行列に入ってからライドシェア車両に乗るまでの時間である．

渋滞が発生しない場合，図-2 より都市内のライドシェア台数とライドシェア利用者数が増加すると 1 人あたりの社会的総費用が減少していることが分かる．これはライドシェア台数とライドシェア利用者数が増えることによって，旅行者がライドシェアを利用したいときに旅行者の近くにライドシェア車両がいる可能性が高くなり，待ち時間が短縮されるためであると考えられる．これは，ライドシェアのサービスに規模の経済がはたらくことを示している．図-3 より，実際にライドシェア台数とライドシェア利用者数の増加に伴って待ち時間が減少していることが確認でき，グラフの形状が似ていることから，1 人あたりの社会的総費用は待ち時間に大きく影響を受けることが分かる．

渋滞が発生する場合，図-2 より都市内のライドシェア台数とライドシェア利用者数が増加すると，1 人あたり

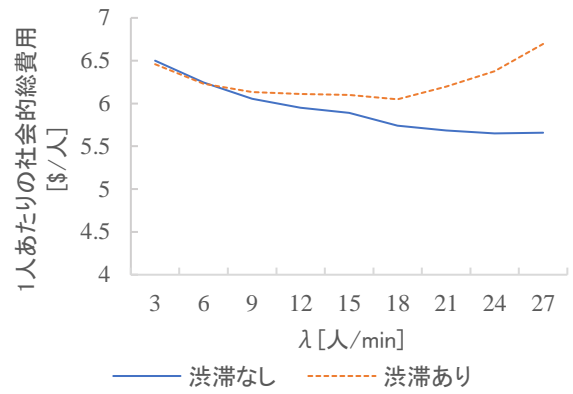


図-2 λと1人あたりの社会的総費用の関係

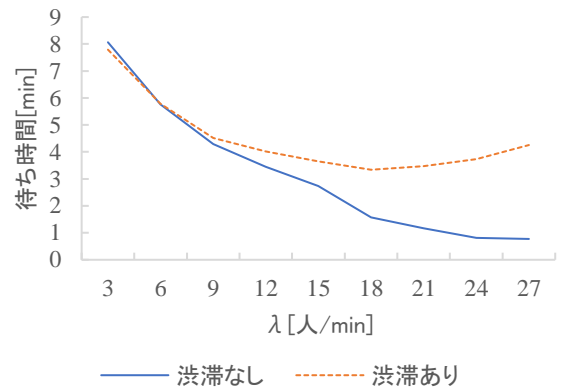


図-3 λと待ち時間の関係

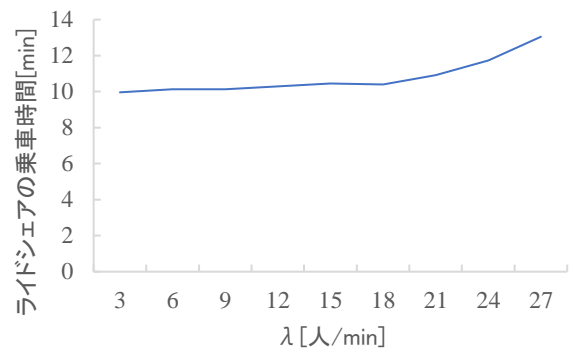


図-4 渋滞ありの場合のλとライドシェアの乗車時間の関係

の社会的総費用は λ が 18 人/min になるまで減少するが， λ が 18 人/min を超えると増加することが分かる．これは， λ の値が小さいときは都市内のライドシェア台数と自家用車台数が少ないため渋滞は起こらないが， λ の値が大きいと都市内のライドシェア台数と自家用車台数が多いため渋滞が発生するからであると考えられる．旅行者がライドシェアの予約を入れてから目的地に到着するまでの旅行時間と待ち時間の差であるライドシェア乗車時間と λ の関係を示すと図-4 のようになる．但し，ライドシェア乗車時間は 600 分のシミュレーション結果の 5 回の

平均である。λが 18 人/min を超えるとライドシェアの乗車時間が急激に増加しているため、このときから大きな渋滞が発生していることが分かる。渋滞が発生すると、客を迎えに行く場合にも渋滞の影響を受けるため待ち時間が増加する。その様子は図-3からも確認できる。したがって、渋滞が発生すると、待ち時間とライドシェア乗車時間が増加するため、1 人あたりの社会的総費用が増加すると考えられる。

また、渋滞が発生しない場合と発生する場合のグラフを比較すると、λが小さいときは 1 人あたりの社会的総費用と待ち時間の両方においてほとんど差がないことが分かる。これは、図-4 よりλが小さいときは渋滞が発生する条件においても、ほとんど渋滞が発生しないためであると考えられる。

以上より、渋滞が発生しない場合は、都市内のライドシェア台数とライドシェア利用者数の増加に伴い待ち時間が減少するため 1 人あたりの社会的総費用が減少するが、渋滞が発生する場合は、渋滞が発生し始めてからは待ち時間とライドシェア乗車時間が増加するため 1 人あたりの社会的総費用が増加する。このことから、ライドシェア事業において、渋滞が発生しない場合には規模の経済による効果が明確に現れるが、現実のように渋滞が発生する場合には混雑による悪影響が規模の経済による効果を上回ることが示された。

5. ライドシェアと公共交通の最適分担比率の分析

本章では、ネットワークの条件や都市内の旅行者数を変化させたときのライドシェアと公共交通の最適分担比率の変化について分析を行う。ここで、本章におけるすべてのグラフの縦軸は 500 分のシミュレーション最適化の結果の 5 回の平均となっている。また、社会的総費用の計算は 500 分のシミュレーションにより行い、遺伝的アルゴリズムを用いたシミュレーション最適化¹²⁾によって社会的総費用を最小化するように分担比率やライドシェア台数を決定する。

(1) 地下鉄の路線本数が固定されている場合のネットワークの大きさと最適分担比率の関係の分析

a) 分析の条件

本節では、地下鉄の路線本数が固定されている条件下でネットワークの大きさが変化したときの最適なライドシェア比率の変化を確認し、その様子が渋滞の発生の有無でどのように変わるのかを明らかにする。

モデルにおけるネットワークは、 $\tau^{vehicle} = 2$, $l =$

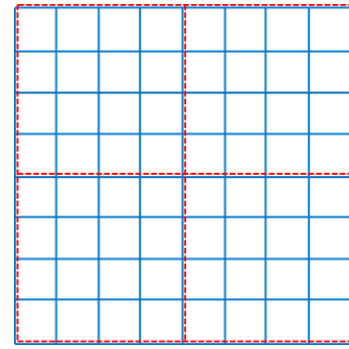


図-5 地下鉄路線が漢字の「田」の形状に配置されているネットワークの例

1, $\tau^{public} = 2$, $\tau^{walk} = 15$ と設定する。ネットワークは $n^{row} = n^{col}$ となるように、すなわち正方形となるようにする。また、地下鉄リンクは、1 行のすべてのノードを結ぶ路線、 $n^{row}/2$ 行のすべてのノードを結ぶ路線、 n^{row} 行のすべてのノードを結ぶ路線、1 列のすべてのノードを結ぶ路線、 $n^{col}/2$ 列のすべてのノードを結ぶ路線、 n^{col} 列のすべてのノードを結ぶ路線の計 6 路線とする。すなわち、図-5のように漢字の「田」の形状になるように地下鉄リンクを配置し、ネットワークの大きさが変化した場合でもそのような配置となるように $n^{interval}$ を設定する。但し、図-5において、実線は道路リンク・徒歩リンク、点線は地下鉄リンクであり、 $n^{row} = 9$, $n^{col} = 9$, $n^{interval} = 4$ の場合のネットワークの例である。また、ネットワークの大きさに伴い都市内の旅行者を増加させるため、都市のノード数に比例させてλを変化させる。以上より、表-2 のように n^{row} , n^{col} , $n^{interval}$, λを設定する。

表-2 n^{row} , n^{col} , $n^{interval}$, λの設定

n^{row}	5	7	9	11	13
n^{col}	5	7	9	11	13
$n^{interval}$	2	3	4	5	6
λ	12.5	24.5	40.5	60.5	84.5

b) 分析結果と考察

表-2のそれぞれの条件に対して、渋滞なしと渋滞ありの場合における最適なライドシェア比率をグラフにしたものが図-6である。但し、渋滞なしの場合は $Z = \infty$ に、渋滞ありの場合は $Z = 5/3$ に設定している。また、最適なライドシェア比率の値はライドシェアによる旅行者数と地下鉄・徒歩による旅行者数の和に対するライドシェアによる旅行者数であり、自家用車による旅行者数は分母に含まない。最適なライドシェア比率のこの定義は 6 章でも同様である。

図-6より、地下鉄の路線本数が固定されているとき、渋滞の条件に関わらずネットワークが大きくなると最適

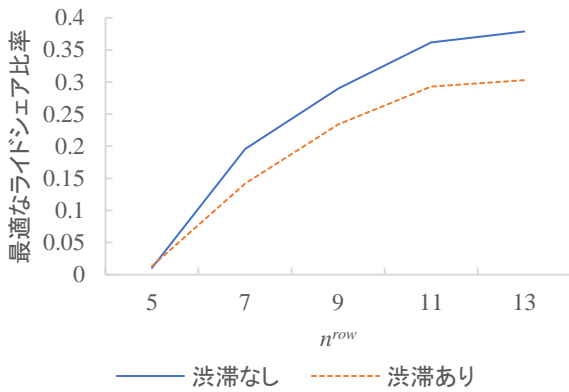


図-6 ネットワークの大きさと最適なライドシェア比率の関係

なライドシェア比率が上がる事が分かる。これはネットワークが大きくなると、地下鉄リンク間の道路リンクの数が多くなり地下鉄の利用に不便な場所が増えるためであると考えられる。また、最適なライドシェア比率は渋滞が起こる場合の方が小さくなる。これは渋滞の発生によって、旅行時間が増加しライドシェアが不利になるためであると考えられる。さらに、4.1 節よりライドシェア台数やライドシェア利用者数が少ない状態は待ち時間が非常に大きくなり、旅行者 1 人あたりのライドシェアの運用コストが大きくなるため、都市内の旅行者数が少なく地下鉄リンクから遠いノードが少ない $n^{row} = n^{col} = 5$ のときは、渋滞の条件に関わらずライドシェアをほぼ使わない状態が最適となっている。

(2) 地下鉄の路線本数が変化する場合のネットワークの大きさと最適分担比率の関係の分析

a) 分析の条件

本節では、地下鉄の路線本数が変化する場合でネットワークの大きさが変化したときの最適なライドシェア比率の変化を確認し、その様子が渋滞の発生の有無でどのように変わるのかを明らかにする。

モデルにおけるネットワークは、 $n^{interval} = 4$, $\tau^{vehicle} = 5$, $l = 2.5$, $\tau^{public} = 5$, $\tau^{walk} = 37.5$ と設定する。ネットワークは $n^{row} = n^{col}$ となるように、すなわち正方形となるようにする。 $n^{interval} = 4$ で固定することによって、ネットワークが大きくなるに伴って路線数が増えるようにする。また、5 章と同様に、ネットワークの大きさに伴い都市内の旅行者を増加させるため、都市のノード数に比例させて λ を変化させる。以上より、表-3 のように n^{row} , n^{col} , λ を設定する。

b) 分析結果と考察

表-3 のそれぞれの条件に対して、渋滞なしと渋滞ありの場合における最適なライドシェア比率をグラフにしたものが図-7 である。但し、渋滞なしの場合は $Z = \infty$ に、渋滞ありの場合は $Z = 4/3$ に設定している。

表-3 n^{row} , n^{col} , λ の設定

n^{row}	5	9	13	17	21
n^{col}	5	9	13	17	21
λ	12.5	40.5	84.5	144.5	220.5

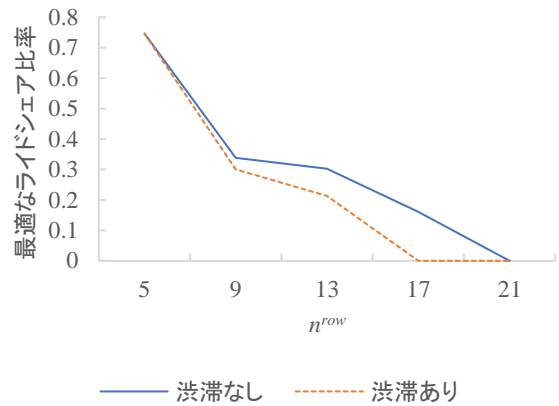


図-7 ネットワークの大きさと最適なライドシェア比率の関係

図-7 より、地下鉄路線の本数が変化するとき、渋滞の条件に関わらずネットワークが大きくなると最適なライドシェア比率が下がることが分かる。これは、 $n^{interval}$ が固定されている場合はネットワークが大きくなるにつれて、地下鉄が有利になるためであると考えられる。地下鉄・徒歩による移動の場合、徒歩による移動に時間がかかりコストが大きくなる。しかし、今回の条件においては $n^{interval}$ が固定されているため、5 章における分析とは異なりネットワークの大きさが変化しても、地下鉄の利用に不便な場所が増えることはない。従って、ネットワークが大きくなるにつれて移動距離が長くなり、ネットワークが小さいときよりも全体のコストの中で徒歩のコストが占める割合が小さくなる。そのため、ネットワークが大きくなると地下鉄の方が便利になり、最適なライドシェア比率が下がると考えられる。但し、本研究においては、全てのノードで発生交通量と集中交通量が等しい状況を想定しており、ネットワークが大きくなると現実の都市の状況とは乖離する。現実同様に都市の中心部の発生交通量と集中交通量が多くなる条件下でシミュレーションを行った場合、結果が変わる可能性が高い。そのため、ネットワークが大きくなるにつれて最適なライドシェア比率が下がるという本節の分析結果は、各地点が偏りなく出発地、目的地に選ばれる均一な都市の場合に当てはまる結果となる。

(3) 都市内の旅行者数と最適分担比率の関係の分析

a) 分析の条件

本節では、都市内の旅行者数が変化した場合の最適分担比率の変化を確認する。

モデルにおけるネットワークは、 $n^{row} = 9$, $n^{col} =$

9, $n^{interval} = 4$, $\tau^{vehicle} = 2$, $l = 1$, $\tau^{public} = 2$, $\tau^{walk} = 15$ に設定する. また, 自家用車を保有していない旅行者が増加する状況を再現するため, 都市内の自家用車利用者数は固定して分析を行う. そのため, λ の値に関わらず 1 分あたりの自家用車利用者数の期待値 $p^{private} \times \lambda$ を一定にする.

以上より, 都市内の自家用車利用者数は変化させずに都市内旅行者数を変化させるため, 表-4 のように λ と $p^{private}$ を設定する. ここでは, $p^{private} \times \lambda = 18$ となるように設定している.

表-4 $p^{private}$ と λ の設定

$p^{private}$	18/20	18/40	18/60	18/80	18/100
λ	20	40	60	80	100

$p^{private}$	18/120	18/140	18/160	18/180	18/200
λ	120	140	160	180	200

b) 最適なライドシェア比率についての分析結果と考察

表-4のそれぞれの条件に対して, 渋滞なしの最適なライドシェア比率をグラフにしたものが図-8, 渋滞ありの最適なライドシェア比率をグラフにしたものが図-9である. 但し, 渋滞なしの場合は $Z = \infty$ に, 渋滞ありの場合は $Z = 5/3$ に設定している. グラフは旅行者の出発地点別に4種類示している. 例えば, 「最寄りの地下鉄路線から1リンク離れたノード」のグラフは, 最寄りの地下鉄路線から1リンク離れたノードを出発地とする旅行者のライドシェア比率を示している. また, 「全ノード」とは「地下鉄路線上のノード」, 「最寄りの地下鉄路線から1リンク離れたノード」, 「最寄りの地下鉄路線から2リンク離れたノード」を含む都市内のすべてのノードを表している. $n^{interval} = 4$ の場合, 最寄りの地下鉄路線から3リンク以上離れたノードは存在しない.

まず初めに, 渋滞の条件に関わらず, $\lambda = 20$ のときは最適なライドシェア比率が0に近い値となっている. これは, 5章における考察同様に都市内の旅行者が少ない場合はライドシェアをほぼ使わない状態が最適になっているためであると考えられる.

渋滞が発生しない場合, 図-8より λ の増加に伴って最適なライドシェア比率が上がっており, $\lambda = 160$ を超えると最適なライドシェア比率がほぼ変化していないことから, 都市内の旅行者数の増加に従って最適なライドシェア比率は上がり, やがて収束することが分かる. これについて考察を行う. 4章より, 渋滞が発生しない場合はライドシェア利用者数の増加に伴って待ち時間が減少するため, 1人あたりの社会的総費用が減少することが分かっている. そのため, 旅行者数の増加によりライドシェア利用者の待ち時間が減少する範囲においては, 最

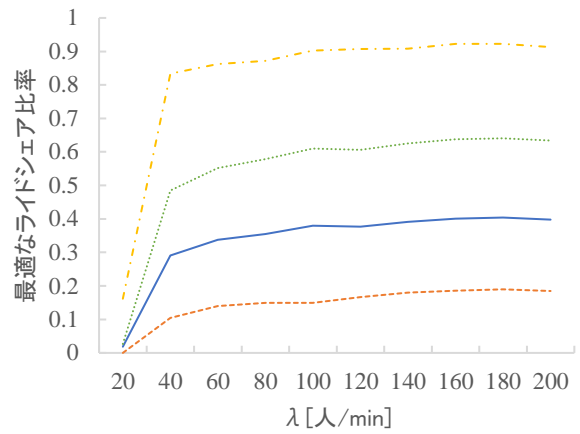


図-8 渋滞なしの場合の λ とライドシェア比率の関係

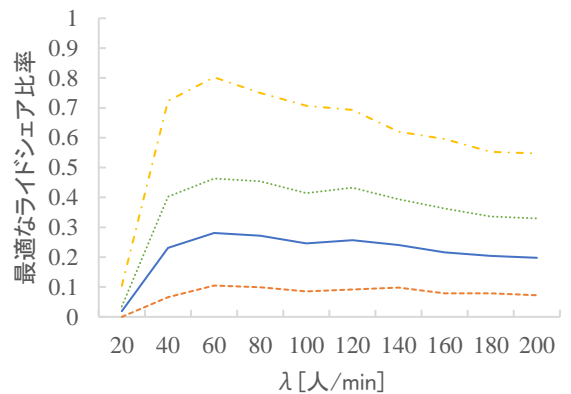


図-9 渋滞ありの場合の λ とライドシェア比率の関係

適なライドシェア比率が上がる. しかしながら, 図-3より待ち時間は収束するため, 最適なライドシェア比率も収束する. 以上の理由により, 最適なライドシェア比率は図-8のようなグラフの形状になると考えられる.

次に, 渋滞が発生する場合は, 図-9より $\lambda = 60$ で最適なライドシェア比率はピークを示し, $\lambda = 60$ を超えると最適なライドシェア比率は下がる. 4章における考察より, λ が小さいときは渋滞があまり発生せず, 渋滞の条件にかかわらず1人あたりの社会的総費用や待ち時間は同様の変化をすることが分かっている. そのため, 図-8の渋滞が発生しない場合のグラフと同様に, $\lambda =$

60までは最適なライドシェア比率は大きく上がると考えられる。仮に、 $\lambda = 60$ を超えても最適なライドシェア比率が大きくなる場合、ライドシェア利用者数の増加に伴って渋滞が大きくなる。その結果、ライドシェアの旅行時間の増加により社会的総費用が増加し、最適な状態から遠ざかる。そのため、図-9のように $\lambda = 60$ を超えると λ の増加に伴って最適なライドシェア比率が下がっていると考えられる。

c) 最適な状態についての分析結果と考察

ここで、最適な状態の特徴を確認する。この確認により、現実の都市を最適な状態に近づけるための糸口を見出すことができる。

まず、旅行者の出発地点別の最適なライドシェア比率に注目すると、「最寄りの地下鉄路線から2リンク離れたノード」、「最寄りの地下鉄路線から1リンク離れたノード」、「地下鉄路線上のノード」の順に下がっていることが図-8、図-9より分かる。このことから、地下鉄路線から近い地点を出発する旅行者は地下鉄を利用し、地下鉄路線から遠い地点を出発する旅行者はライドシェアを利用することで最適な状態に近づけることができると考えられる。現実の都市でも公共交通の利用に便利な場所では公共交通を利用する人が多く、この傾向がシミュレーションにおいても最適な状態に近づくのに貢献していることが確認できた。

続いて、渋滞が発生する場合の λ と車両乗車時間の関係を図-10に示した。自家用車の乗車時間は自家用車による旅行時間と等しく、ライドシェアの乗車時間はライドシェアによる旅行時間と待ち時間の差である。 λ の増加により渋滞が大きくなるため、自家用車の乗車時間は増加している。一方で、 λ の増加により渋滞が大きくなるにも関わらず、ライドシェアの乗車時間は $\lambda = 120$ を超えると減少している。これは渋滞が大きくなるとライドシェア利用者の移動距離が短くなることを示している。以上より、渋滞が大きいときは近距離の移動の際にライドシェアを利用し、遠距離の移動の際には地下鉄を利用することで最適な状態に近づけることができると考察できる。

最後に、最適なライドシェア台数に注目した分析を行う。

図-11は λ と最適なライドシェア台数の関係を示したグラフである。渋滞が発生しない場合は、最適なライドシェア台数は都市内の旅行者数の1次関数の関係で増加することが分かる。一方で、渋滞が発生する場合の最適なライドシェア台数は、渋滞が小さい $\lambda = 60$ までは渋滞が発生しない場合の最適なライドシェア台数とほぼ変わらないが、渋滞が大きくなると渋滞が発生しない場合の最適なライドシェア台数と大きな差が生じている。以上より、ライドシェア事業に関する交通政策を考える上

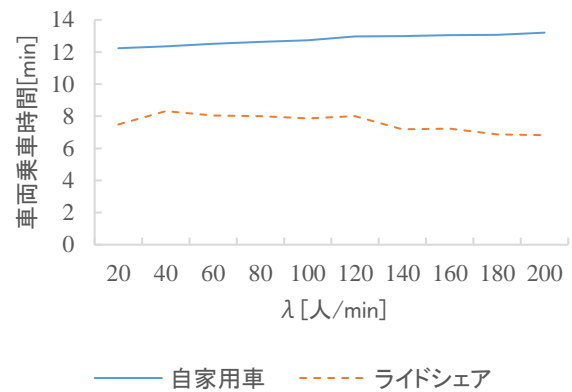


図-10 渋滞ありの場合の λ と車両乗車時間の関係

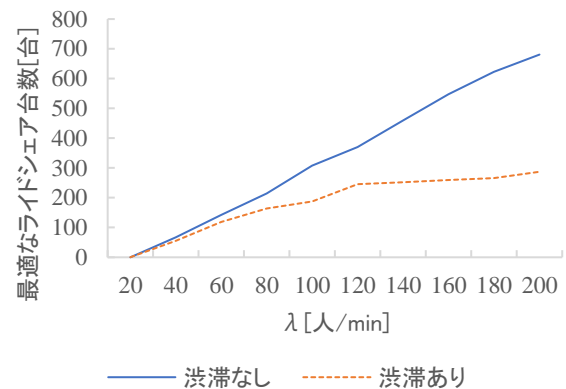


図-11 λ と最適なライドシェア台数の関係

で渋滞を軽減し最適な状態に近づけるためには、渋滞を考慮した上でライドシェア台数を適切に抑制することが必要であることが分かる。

6. おわりに

(1) 結論

本研究では、ネットワーク内で公共交通の利便性に差がある状態を仮定したモデルを用いて、ネットワークの大きさや都市内の旅行者数と最適分担比率の関係を確認した。その結果、ライドシェアと公共交通の最適分担比率および最適なライドシェア台数が存在し、最適分担比率と最適なライドシェア台数は渋滞が発生する場合と発生しない場合で異なることが示された。これにより、ライドシェア事業の抑制や促進に関する交通政策を行う際には渋滞を考慮する必要があることを明らかにした。また、公共交通の利便性の差による最適分担比率の違いや、渋滞の深刻化に伴うライドシェアによる移動距離の変化が確認された。これらは、実際にライドシェア事業に対する価格規制等を行う際の価格設定に大いに貢献できると考えられる。

(2) 今後の課題

今回用いたモデルでは、旅行者の出発地と目的地が都市内のいずれかのノードであり、出発地と目的地のノードはランダムに選択されるものと仮定している。しかし、現実では都市の中心が出发点や目的地になる可能性が高く、またリンクの途中が出发点や目的地になることがしばしばある。本研究ではこれらを表現できておらず、モデルの仮定に改善の余地がある。また、地下鉄の運行間隔を設定できるようにすることによって、地下鉄駅での待ち時間や乗り換え時間が表現でき、より正確なシミュレーションを行うことができる可能性がある。さらに、本研究における分析では、渋滞が発生する条件における交通容量を 5/3 [台/min] や 4/3 [台/min] にしたが、現実では 1 車線あたり 2200/60 [台/min] 程度であるため大きく異なっている。 λ の値も最大で 220.5 人/min となっており、現実の値よりも大幅に小さい。

以上より、ネットワークの仮定および交通容量、旅行者数の設定をより現実に近づけることが、より正確な分析のために求められていると考える。

参考文献

- 1) Zirui Li, Yili Hong and Zhongju Zhang: An Empirical Analysis of On-Demand Ride Sharing and Traffic Congestion, Proc. International Conference on Information Systems 2016, 2016.
- 2) Lisa Rayle, Danielle Dai, Nelson Chan, Robert Cervero and Susan Shaheen: Just a better taxi? A survey-based comparison of taxis, transit, and ridesourcing services in San Francisco, Transport Policy, Vol. 45, pp. 168-178, 2016.
- 3) Niels Agatz, Alan L. Erera, Martin W.P. Savelsbergh and Xing Wang: Dynamic Ride-Sharing: a Simulation Study in Metro Atlanta, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 17, pp. 532-550, 2011.
- 4) 長晃, 馬東来, 高原勇, 大澤義明: 相乗り型ライドシェアにおける乗り換え効果, 都市計画論文集, 53 巻 3 号, pp. 597-602, 2018. [Akira CHO, Donglai MA, Isamu TAKAHARA and Yoshiaki OHSAWA: Analysis on the Matching of Ride Share Caused by Transfer, Journal of the City Planning Institute of Japan, Vol. 53, No.3, pp.597-602, 2018.]
- 5) Long Jiancheng, Tan Weimin, Szeto W.Y. and Li Yao: Ride-sharing with travel time uncertainty, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 118, pp. 143-171, 2018.
- 6) Mitja Stiglic, Niels Agatz, Martin Savelsbergh and Mirko Gradisar: Enhancing urban mobility: Integrating ride-sharing and public transit, Computers & Operations Research, Vol. 90, pp. 12-21, 2018.
- 7) Meng Li, Guowei Hua and Haijun Huang: A Multi-Modal Route Choice Model with Ridesharing and Public Transit, New Governance Model and Strategy to Improve a Sustainable Transport System, Vol. 10, Issue 11, 2018.
- 8) Kyunghee Lee, Qianran Jin and Jui Ramaprasad: Impact of Ride-Hailing Services on Transportation Mode Choices, Evidence from Traffic and Transit Ridership, MIS Quarterly, 2022.
- 9) Xuegang (Jeff) Ban, Maged Dessouky, Jong-Shi Pang and Rong Fan: A general equilibrium model for transportation systems with e-hailing services and flow congestion, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 129, pp. 273-304, 2019.
- 10) Yuanyuan Li, Yang Liu and Jun Xie: A path-based equilibrium model for ridesharing matching, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 138, pp. 373-405, 2020.
- 11) Caio Vitor Beojone and Nikolas Geroliminis: On the inefficiency of ride-sourcing services towards urban congestion, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 124, 2021.
- 12) Abhijit Gosavi: Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning, Springer, 2015.

RESEARCH ON THE OPTIMAL MODAL SHARE BETWEEN RIDESHARING AND PUBLIC TRANSPORTATION

Taiki YAMASAKI, Shunsuke SEGI

Recently, ridesharing has been attracting attention as a solution to traffic congestion and air pollution, and is actively used in many countries around the world. On the other hand, the existence of people who switch from public transportation to ridesharing and the ease of participation in the ridesharing business have led to cases of ridesharing vehicles causing traffic congestion. However, there are few studies that have examined the optimal modal share between public transportation and ridesharing in consideration of traffic congestion, or that have considered complex networks. In this study, we examine the optimal sharing ratio between ridesharing and public transportation under

different conditions, such as the presence of traffic congestion and the network. For the network, we assume a realistic grid network with some points far from the station and some points close to the station. As a result, it is found that the optimal sharing ratio between ridesharing and public transportation depends on the presence of traffic congestion, and that traffic congestion should be taken into account when implementing ridesharing policies. The results also show that the optimal sharing ratio differs depending on the convenience of public transportation, and that the distance traveled by ridesharing changes with the severity of traffic congestion.