

Shared autonomous vehicle を前提とした 需要偏在下のネットワーク計画問題

井料 隆雅¹・浦田 淳司²

¹正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: iryo@tohoku.ac.jp

²正会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

自動運転技術が今後発展し完全に無人での運転が実現するようになると、自動運転車を社会で共有し、需要のあるところに無人で回送して使用することが可能になる。そのような共同利用される車両のことは Shared autonomous vehicle (SAV) と呼ばれる。SAV は回送という追加的な交通需要を発生させる。しかし従来の交通計画では回送を主要な交通需要の発生源とはしていなかった。本研究では、特にシステム最適配分を前提とした際に、SAV の回送交通が道路ネットワークに与える影響を、特に、回送の主要な発生源となる需要の空間的偏在に着目した数理モデルにより分析した。結果、特に SAV の台数が少ないときに、回送される車両をさばくために旅客の需要と反対方向の交通容量の確保が必要となることと、ピーク交通の集中がシステム最適配分において、回送を原因とする特有の交通の時間的集中を発生させることがわかった。

Key Words: *shared autonomous vehicle, network planning system optimal assignment*

1. はじめに

道路の新しい使われ方として、移動サービスの供給側である車両と運転手を需要側である旅客と、情報技術を活用しつつさまざまな方法で結びつける Ride-Sourcing が台頭しつつある。例えば Conway¹⁾ は、米国における for-hire service の市場は 2009 年から 2017 年で倍になったとしている。Ride-Sourcing に関する研究も盛んであり、そのレビューとしては例えば Wang and Yang²⁾ がある。Ride-Sourcing は MaaS (Mobility-as-a-Service) の一種、あるいはそれを構成する要素でもあり、今後の交通手段の多様化によってその需要がより大きくなることも予想される。特に、将来完全自動運転車が実現すれば、それによるシェアライド (Shared autonomous vehicle: SAV) は現行の Ride-Sourcing と異なり運転手に関わるコストが不要となる。そのような状況になれば、SAV は道路交通のかなりの部分を占める可能性もあるといえよう。SAV に関するレビュー^{3),4)} では、67~90%の車両が SAV に置き換わる可能性や、SAV の共有形態や公共交通との連携方法によって都市空間自体も大きく変容すると指摘している。

Ride-Sourcing に関する既存研究では、アプリを介したオンラインマッチングによるサービス提供により、客を乗せていない状況での移動 (回送) が従来のタクシー (路側でマッチング) よりも増えるので、ある一定以上の需要が生じると、客の待ち時間が増え、サービス提供

量 (乗客を移送した数) が減少する Wild Goose Chase (無駄骨) 問題が起こるためにマッチング半径の限定が必要であると指摘している^{5),6)}。これらの理論モデルを基に、マクロ的な車両移動の評価モデルを実装し、大都市ネットワーク上で動的/コドン/OD プライシングによるサービス評価が実装されている⁷⁾。また、需要偏在下においても、効率的なサービス提供のためには、需要が少ない地域への客移送割合を調整する必要があると指摘されている⁶⁾。特に、回送移動時のドライバーの行動選好の分析も進んでおり、需要少地域も含めた圏域でのサービス効率向上が期待されている^{8),9),10)}。

上述の回送に関する研究は、現行の Ride-Sourcing サービスを前提としたものであり、旅客側の需要管理については、アプリでマッチングするところを別にすれば特段の工夫がなされているわけではない。将来の SAV の実現を前提にするのであれば、需要管理側についても、リアルタイムでのマッチングではなく、より高度なシステムが実現することを考えてもよいだろう。最も理想的な状況であれば、前日にすべての需要が把握されており、それらに対しシステム最適になるように SAV への乗車時間を指定することも可能となるかもしれない。そのような状況の下で、SAV の回送交通がどのように発生するのか、また、その存在がネットワーク計画にどのように影響するのか、その性質をいまの段階から定性的にでも知ることは、インフラ整備にかかる時間を考慮すれば有用な知見となることが期待で

きよう。

上記のような理想的な状況における SAV の運行計画や関連するインフラ投資の最適化を含めるシステム最適配分問題は、旅客数や交通量を実数にすることにより線形計画問題として定式化できる。Seo and Asakura¹¹⁾ は、この考えに基づいた線形計画問題の定式化を行った。この論文では、旅客の一般化交通費用のほか、SAV の運用やインフラ整備にかかる費用を目的関数とする多目的最適化問題を定式化している。線形計画問題は凸計画問題であることを活用し、目的関数の重みづけによりパレート面の情報を取得することを行っている。なお、この研究では出発時刻は固定されており、それを原因としてネットワーク内で発生する待ち行列はノード上に発生するとしている。

本研究では、システム最適配分下で発生する SAV の回送がネットワーク計画問題に与える影響を、上述のような線形計画問題による定式化を用いて分析する。本研究におけるポイント（特に、Seo and Asakura¹¹⁾ との差異）は以下の通りである。まず、旅客の出発時刻は外生的には与えず、希望到着時刻と到着地でのスケジュールコストを所与とする出発時刻選択問題の形で与えることである。旅客の出発時刻は、ネットワーク内での混雑を完全になくす制約の下で、スケジュールコストを含む一般化交通費用が最小になるように決定される。次に、回送交通の影響を見るために、特に需要が偏在した状況を考えることである。主なのは空間的偏在であり、特に、ネットワーク内で集中交通量を持つノードを限定することによりこれを考慮する。時間的偏在も回送交通に影響を与える。出発時刻選択問題は希望到着時刻にピークがある状況を記述するのに適している。同時刻に目的地に到着したがる旅客が多ければ、そのための車両を供給する回送交通の発生が増える可能性がある。

本稿の構成は以下の通りである。第 1 章で研究の背景と目的を説明した。第 2 章では SAV 交通モデルの定式化をおこなう。第 3 章で SAV 交通モデルによる最適化問題の定式化を行う。この章ではネットワーク計画に関する結果の評価方法の定式化も行う。第 4 章で数値計算の設定について説明する。第 5 章で数値計算の結果をしめし、その考察を行う。第 6 章でまとめと今後の課題を説明する。

2. SAV 交通モデルの定式化

本研究では SAV 配分問題を線形計画問題で定式化している。連続交通量を前提とするネットワーク交通量はリンクでの遅れが発生しなければ線形システムで記述できることはよく知られていることであり、本研究で

もその特性を活用している。以下では利用者を「旅客」と呼ぶことにする。旅客は指定された起点ノードから終点ノードまで必ず SAV に乗車して旅行を行う。1 台の SAV には 1 人の旅客が乗車する。

旅客の利用者特性は、目的地と、目的地でのスケジュールコストの 2 つで特徴づけられる。これら 2 個が同一の利用者は同じグループに属する。グループ k の目的地を $r(k)$ とする。

ネットワークはノード N とリンク L から構成される。リンクは起点と終点ノードの組み合わせで特定される。ネットワーク上では、実車の (= 旅客が乗車している) SAV か、回送の (= 誰も乗車していない) SAV のいずれかが流れている。リンクには指定された単位時間あたり通行可能容量があり、容量を超えた SAV は通過できない。リンクでは遅れ時間は発生せず、常に自由流旅行時間が保たれる。本研究では時刻を整数で考える。時刻の集合を T で示す。 T はすべての整数の集合（すなわち $-\infty$ から ∞ ）である。実際の計算の際には、具体的に定式化した問題に対して十分な幅を持つ集合を T に与えればよい。ノード i と j を結ぶリンク (i, j) の旅行時間が τ_{ij} であれば、時刻 $t - \tau_{ij}$ にノード i からこのリンクに流入した車両は、そのまますべて時刻 t にノード j へ流出する。

ネットワーク上の車両による交通流は、ノード単位の交通流保存則により記述する。以下、「グループ k の実車交通量」は、グループ k の旅客が乗車する SAV の交通量を示す。ノード i から出発するグループ k の旅客数の合計を $d_i^k \geq 0$ 、ノード $r(k)$ に到着するグループ k の旅客数の合計を $a^k \geq 0$ とする。旅客は出発時刻を自由に選べるので、これらは時刻には依存しない。また、ノード i を出発地とし時刻 t に出発するグループ k の実車交通量を $y_i^k(t)$ とし、時刻 t に目的地に到着するグループ k の実車交通量を $z^k(t)$ とする。時刻 t にリンク (i, j) からノード j に流出するグループ k のリンク実車交通量を $x_{ij}^k(t)$ とする。SAV のリンクの全交通量（すべての k のリンク実車交通量とリンクを走る回送車両の交通量（回送交通量）の合計）を $x_{ij}(t)$ とする。リンク (i, j) の容量を μ_{ij} と書く。リンク (i, j) の旅行時間は正の整数であるとし、 τ_{ij} と書く。本研究では $i = j$ となるリンク（同一のノードに戻ってくる）も許容する。このリンクは SAV の駐車場を記述している。 $x_{ii}(t)$ は時刻 $t-1$ から t までノード i に隣接する駐車場で待機していた車両の数を示す ($\tau_{ii} = 1$ と常に設定する)。

旅客の一般化交通費用は、SAV に乗車している時間と目的地に到着した時刻に応じて受けるスケジュールコストの合計とし、SAV に乗車した時間の単位で示す。スケジュールコストは、旅客の利用者特性によって外生的に与えられる。グループ k が目的地に時刻 t に到着

したときのスケジュールコストを $s^k(t)$ で示す。SAV の運用コストは走行時間の合計とし、走行時間の単位で示す。駐車場にいる時間は走行時間に含まない。

上記で定義した各交通量間には保存則を含むいくつかの条件式が成立する。まず非負制約として

$$x_{ij}^k(t) \geq 0, x_{ij}(t) \geq 0, y_i^k(t) \geq 0, z^k(t) \geq 0, \mu_{ij} \geq 0 \quad (1)$$

がすべての $i \in N$, $(i, j) \in L$, $k \in K$, 時刻 t で成立するとする。実車交通量は全交通量を超えることはできないので、

$$x_{ij}(t) \geq \sum_{k \in K} x_{ij}^k(t) \quad (2)$$

も成立しなくてはならない。また、ノード i に流入するグループ k の実車交通量を、流入、流出の順に

$$f_i^k(t) = \sum_{j \in I_i} \{x_{ji}^k(t) + y_i^k(t)\} \quad (3)$$

$$g_i^k(t) = \sum_{j \in J_i} \{x_{ij}^k(t + \tau_{ij}) + \delta_{ir(k)} z^k(t)\} \quad (4)$$

とすれば (I_i, J_i はノード i に隣接する上流ないし下流側のノードの集合、 $\delta_{ir(k)}$ は $i = r(k)$ のときは 1, それ以外では 0), ノードでの交通量保存則

$$f_i^k(t) = g_i^k(t) \quad (5)$$

がすべての $i \in N$ と $k \in K$ と時刻 t で成立する。ノードでの交通量保存則は、全交通量についても成立する。すなわち、

$$f_i(t) = \sum_{j \in I_i} x_{ji}(t) \quad (6)$$

$$g_i(t) = \sum_{j \in J_i} x_{ij}(t + \tau_{ij}) \quad (7)$$

$$f_i(t) = g_i(t) \quad (8)$$

がすべての $i \in N$ と時刻 t で成立する。SAV はネットワークから消えないので、実車交通量のように発生集中交通量の項がないことに注意したい (駐車場もリンクで記述されていることにも注意)。リンクでの容量制約は

$$x_{ij}(t) \leq \mu_{ij} \quad (9)$$

となる。これは駐車場 ($i = j$) では駐車可能台数の制約に相当する。発生集中交通量による制約はグループごとと与えられ、

$$\sum_{t \in T} y_i^k(t) = d_i^k \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T} z^k(t) = a^k \quad (11)$$

がすべての $i \in N$ と $k \in K$ で成立する、となる。

本研究では時刻 1 以降に車両が走行し始めるとし、時刻 0 以前では駐車場以外のネットワークは空であると

する。すなわち、

$$x_{ij}(t) = 0 \quad \forall (i, j) \in L \text{ and } i \neq j \text{ and } t \leq 0 \quad (12)$$

が成立する。また、すべての SAV は初期時刻 0 において駐車場に存在する。ノード i の駐車場における初期台数を n_i すると、

$$x_{ii}(0) = n_i \quad \forall i \in N \quad (13)$$

が成立する。SAV の総台数は固定されているが、各駐車場での初期台数は総台数の範囲で決定できる (すなわち n_i は最適化問題で変数となる)。この制約は、SAV の総台数 (以下、単に総台数と呼ぶ) を n として

$$\sum_{i \in N} n_i = n \quad (14)$$

とかける。

ネットワーク計画問題を記述するために、本研究では駐車場を除くリンクの容量も変数とする。リンクの容量については、旅行時間で重みをつけた合計に上限を設ける。すなわち、上限 (これを総容量と呼ぶ) を M として、

$$\sum_{(i,j) \in L, i \neq j} \tau_{ij} \mu_{ij} \leq M \quad (15)$$

という制約を置く。駐車場制約については本研究では計画変数とはしない (もちろん、本来であれば考慮すべきであるが、今回はリンク容量を優先して考える)。どの駐車場も SAV の総台数 n 以下の車両を保持可能とする。

最適化問題の目的関数として用いる総費用を定義する。旅客の一般化交通費用のうち、乗車時間によるもの (乗車費用) の合計 C は、

$$C = \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in K} x_{ij}^k(t) \quad (16)$$

である。スケジュールコストの全旅客での合計 S は

$$S = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} z^k(t) s^k(t) \quad (17)$$

である。車両の総走行費用は

$$V = \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in L, i \neq j} x_{ij}(t) \quad (18)$$

である。

3. 最適化問題の定式化と結果の評価

システム最適を前提とする本研究においては、目的関数を適切に設定できれば最適化問題の定式化は直ちに可能である。例えば、社会的費用を C, S, V の線形結

合と定式化すれば,

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \alpha(C + S) + \beta V \\ & \text{s.t. all constraints}(M, n) \end{aligned} \quad (19)$$

と最適化問題を定式化できる。ただし、式中にある、‘all constraints(M, n)’は式(1)-(15)を連立したものであり、引数の M と n は、制約式内に含まれるパラメータのうち本研究で操作するものである総容量と総台数を示す。また、 α 、 β はそれぞれ正の定数で、それぞれ旅客の一般化交通費用と SAV の走行費用に対する重みを示す。

SAV が一般に普及していない現段階で、旅客の一般化交通費用と SAV の走行費用に対する重みを適切に決めることは難しい。Seo and Asakura¹¹⁾ではこの問題を多目的最適化問題により定式化し、線形計画問題であることを利用して、これらの重みを変化させることでパレート面を計算している。本研究では、特に旅客の一般化交通費用のみを重視することを前提とし、もっぱら $\alpha \gg \beta$ の設定のみで計算を行う。

システム最適解により実現する解の評価における重要な指標として、ネットワークへの各リンクの容量の割り振られ方がある。特に、需要偏在下であることを考えれば、同一のノードペアを互いに異なる方向に結ぶリンクに割り振られる容量が同一にならないことも考えられる。このことを評価するために、各リンクにおける対向車線との容量の差を示す指標（偏り指標）を定義する。具体的には、

$$W = \frac{1}{2M} \sum_{(i,j) \in L^*} |\tau_{ij}\mu_{ij} - \tau_{ji}\mu_{ji}| \quad (20)$$

と定義する。ここで、 L^* は対応する逆方向のリンクを持つリンクの集合である。この指標は、 M が大きすぎて制約条件の等号が不成立の場合には、線形計画問題内での容量の設定が不定になる場所が出てしまう。また、そうでなくても最適解が一意に定まらない（凸集合としてはもちろん定まる）場合には、 W が一意に定まらないこともありうる。この問題を簡便に回避するために、今回は、最適解の中では、 (i, j) と (j, i) のうち、ノードの順序（例えばノード番号の大小により定める）がより大きい、あるいは小さいリンクに容量を優先的に割り振るような結果になるように、最適化問題の目的関数にペナルティ項を加えている。もちろんノードの順序に依存する結果になるので、ノードの順序が「より大きい」と「より小さい」の両方について計算を行い、より小さい W を採用するようにしている。以上の方法は W の一意性を確保するに十分とは言えず、本来であれば、例えば最小と最大の W を解集合から求めるなど、より一般性のある方法を用いる必要があるが、これは非線形最適化を伴い計算が煩雑なることから、今

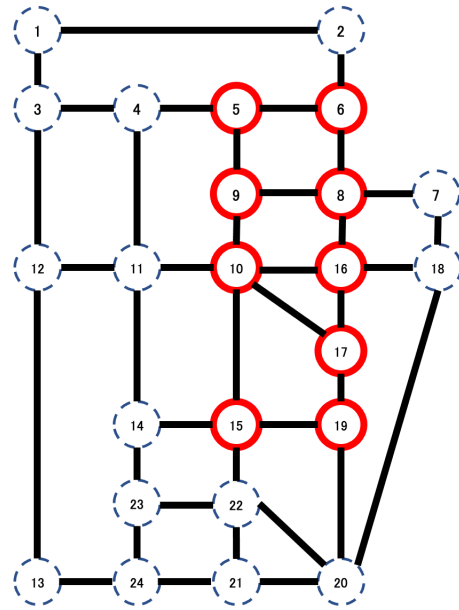


図-1 集中交通量を設定したノード（太線丸）

回は行っていない。

4. 数値計算例の設定

本研究では2つの例を設定しそれらに対し数値計算を実施し、 n と M について複数の値を与えて計算を行い、その結果を整理する。また、その結果の考察を示す。

2つの例のうち、1つ目（例1）では1起点1終点2リンクのネットワークを考える。2リンクのうち1本は起点から終点の、もう1本は、回送用の終点から起点のネットワークである。リンクの旅行時間は2とする。OD交通量は起点から終点まで合計100とする。2つ目（例2）においては、Sioux Falls ネットワークを用いる。ただし、図1で示すノードにのみ集中交通量を設定し、ほかのノードからは発生する交通量のみとすることにより、需要の偏在を記述している（図1で示したノードも発生交通量を持つことに注意）。OD交通量の総量は1756である。リンクの旅行時間は最大で6程度である。例1,2いずれにおいても、目的地の希望到着時刻を $t=70$ とし、早着ペナルティを時刻1あたり0.5、遅刻ペナルティを時刻1あたり20としている。

5. 数値計算の結果

(1) 例1：1起点1終点ネットワーク

例1の1起点1終点ネットワークの計算結果を示す。このケースでは、総台数 n を100とすればSAVの回送をすることなくすべての旅客を終点まで輸送できる。この状態において総容量 M を操作すれば、一般的なシン

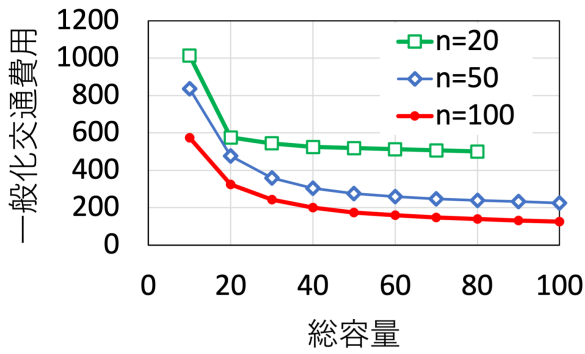


図-2 例 1 の一般化交通費用

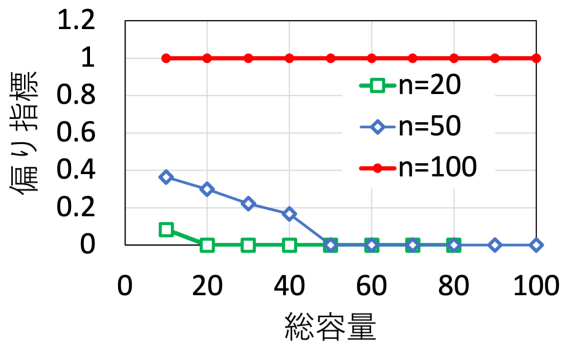


図-3 例 1 の偏り指標

グルボトルネックの出発時刻選択問題の最適解が得られる。 n としては 20,50,100 を用い、 M としては 10 以上の複数の値を用いる。 M の上限は 100 としたが、 n が小さいときは、その SAV の総台数に対しては 100 は過剰となりうる。そのような M についての計算は行っていない。

図 2 に一般化交通費用 $C+S$ を、図 3 に偏り指標 W を示す。 n, M が大きいほど一般化交通費用が少ないという、直感と矛盾しない結果が出ている。 W についてはパラメータの設定によりかなり異なる結果となっている。 $n=100$ の場合は偏り指標は 1 となる。すなわち、起点から終点まで方向のリンクに全容量が割り振られていることになる。この場合は、1 人 1 台の SAV が確保されており、終点から起点への回送の必要がないので、これが最適解になること簡単に理解できる。 $n < 100$ の場合は W は 0 から 0.4 程度になる。また、 n が小さいほど、 M が大きいほど W が小さくなる傾向があることがわかる。

図 4 から 6 に時刻ごとの目的地到着旅客数を、3 つの n と M について示す。 $n=100$ は SAV ではない通常の出発時刻選択問題のシステム最適解と同じように、希望到着時刻にできるだけ近い時間帯に容量いっぱい到着する到着時刻分布になっていることが確認できる。

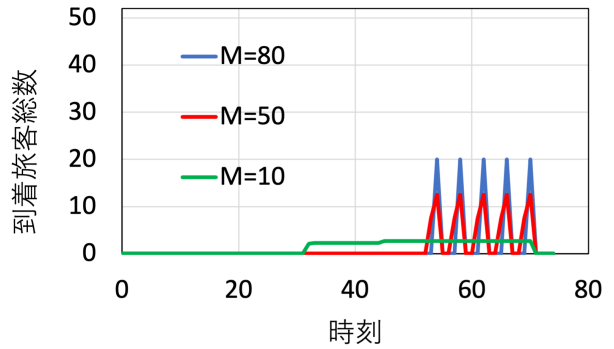


図-4 時刻ごとの目的地到着旅客数 ($n=20$)

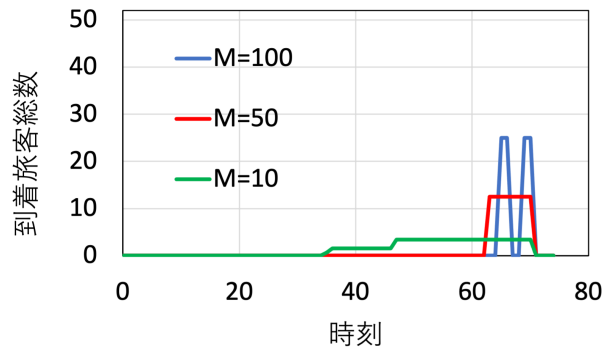


図-5 時刻ごとの目的地到着旅客数 ($n=50$)

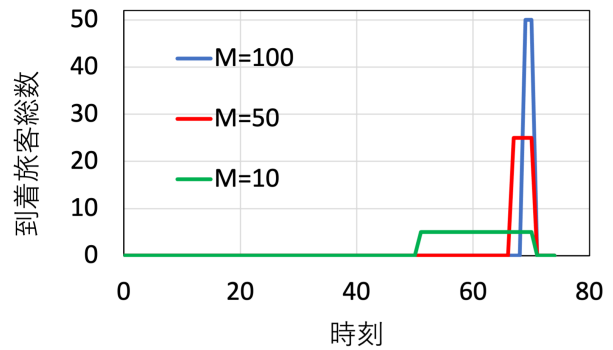


図-6 時刻ごとの目的地到着旅客数 ($n=100$)

$n < 100$ では、総容量が大きいときに複数の到着ピークが存在することが確認できる。

上記の結果で見られる複数のピークは、目的地に希望到着時刻どおりに到着できる旅客をできるだけ多くしようとした結果発生したと考えられる。希望到着時刻どおりに到着できる旅客を増やすと、そのときにすべての SAV を活用しなくてはいけなくなり、それに乗切らない旅客については、回送により制約される時刻のうち可能な限りもっとも遅い時刻に到着しようとする。これにより、旅客数を総台数で除した値と等しい

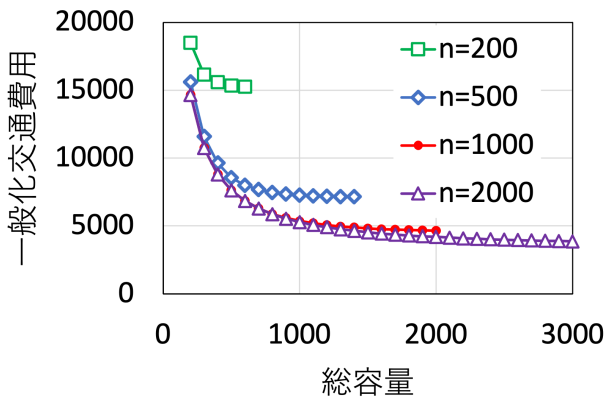


図-7 例 2 の一般化交通費用

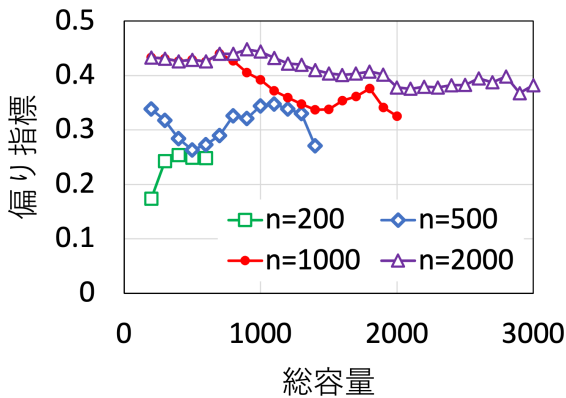


図-8 例 2 の偏り指標

数の到着ピークが発生することになる。今回は希望到着時刻を 1 個しか与えていないので、このような極端な答えとなったが、この結果は、時間的ピークが需要に存在する限り、程度の差こそあれこのようなムラが SAV の運用に発生しうることを示しているといえよう。総容量が小さいときには、小さい総容量がピークの形成を阻害するために、このようなムラは見られない。

(2) 例 2 : Sioux Falls ネットワーク

例 2 の Sioux Falls での計算結果を示す。n としては 200,500,1000,2000 を用い、M としては 200 以上の複数の値を用いる。SAV に対して過剰となる M についての計算は行っていない。計算結果の整理の方法は例 1 と同様である。

図 7 に一般化交通費用 $C+S$ を、図 8 に偏り指標 W を示す。n, M が大きいほど一般化交通費用が少ないという傾向は例 1 と変わらない。n = 200 では総容量を増やしても一般化交通費用が改善されないこと、n = 1000 と n = 2000 では一般化交通費用があまり変わらないことがわかる。後者については n = 2000 は OD 交通量の総量 (1756) よりも大きく、SAV に余剰が発生してい

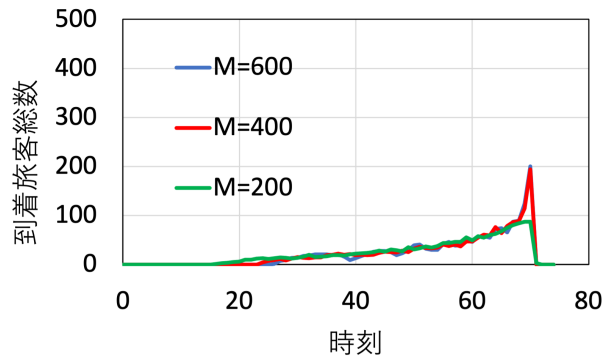


図-9 時刻ごとの目的地到着旅客数 (n = 200)

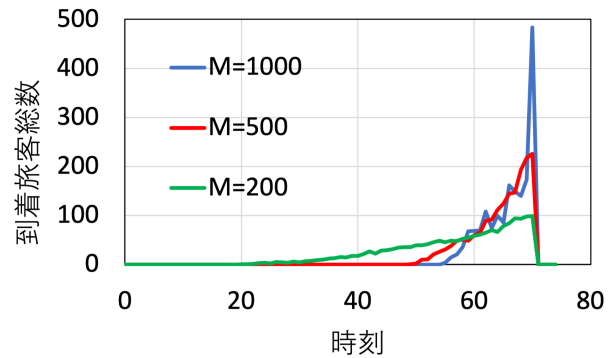


図-10 時刻ごとの目的地到着旅客数 (n = 500)

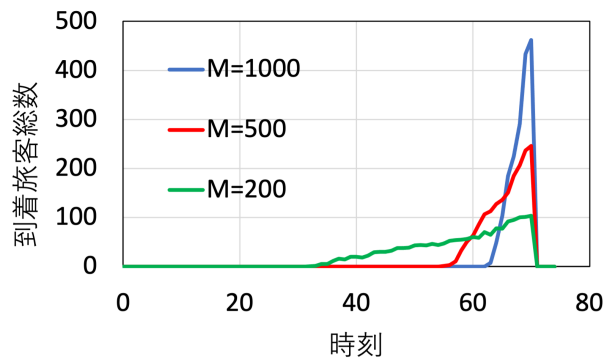


図-11 時刻ごとの目的地到着旅客数 (n = 1000)

ることも原因と思われる。偏り指標については、例 1 のように M に対して単調な変化にはならない。n が大きいものについては M の増加に対して減少する傾向があるものの明確ではない。一方、n が小さいほど W が小さい傾向は例 1 と同様に確認できる。

図 9 から 11 に時刻ごとの目的地到着旅客数を、n = 2000 以外の 3 つの n と 3 つの M (n の値により個別に設定) について示す。例 1 のように複数ピークが現れるような極端な結果とはなっていないが、旅客数の曲線に細かい増減が見られるケースも n = 200,500 では

見られる。

(3) 数値計算結果のまとめと考察

例 1, 2 に共通して確認できた性質は以下の通りである：

1. 総容量と総台数が大きいほど一般化交通費用は小さくなる。ただし、これらのパラメータの増加が一般化交通費用の減少にそれほど寄与しない状況もある。
2. 総台数が大きいほど偏り指数は大きくなる。総容量との関係は必ずしも明確ではないが、総容量が大きいほど小さくなる傾向があるケースもある。
3. 総台数に対して総容量が大きいとき、目的地への到着パターンには複数のピークが現れるような、単調ではない「ムラ」が見られる。

これらのうち、1 については自明な関係であるが、それが今回も確認できたということになる。また、図 7 は、総容量が少ない時は総台数の多寡にかかわらず一般化交通費用はあまりかわらず、総容量が多くなるとその差が出ることを示している。この結果は、SAV の台数に見合わないほど過大な容量を確保する意味がないという、比較的自明な命題を確認するものといえよう。

2 は需要偏在下の回送交通に関連する性質である。2 のうち、特に総台数との関連は、OD 交通量の総量に対して総台数が多いと回送の回数が減り、回送用の容量の確保の重要性が減少することが原因と考察できる。逆に、総台数が少ないときは、需要の偏在にかかわらず SAV の往復の移動が重要となり、そのために双方向の容量を確保するようになっていられると考えられる。一方で、総容量との関係については明確な理由は見当たらない。この関係は例 2 ではそれほど明確でなく、あまり重要な特徴ではないかもしれない。

3 の結果も需要偏在下の回送交通に関連する。このようなムラのある到着交通量パターンの発生は、希望到着時刻のピークを起因とするものであり、それがどの程度あるかでムラの程度も変わってくるだろう。イベントのような同質性の高い交通需要の場合には注意する必要があるし、また、そのようなピークに対応できる容量が確保されていれば、それだけスケジュールコストを下げられることが期待できよう。

6. まとめと今後の課題

本研究では、SAV を前提とした需要偏在下のネットワーク計画問題を、特に回送交通に着目して分析するために、SAV を前提とするシステム最適配分問題を線形計画問題で定式化し、その性質の分析を行った。定式化は Seo and Asakura¹¹⁾ による線形計画問題と共通するところが多いが、到着地でのスケジュールコストを

与える出発時刻選択問題により問題を定式化しなおし、自由流制約下でのシステム最適配分を行うようにしている。需要偏在下のネットワーク計画問題を分析するために、旅行者の一般化交通費用を最小化するシステム最適配分を定式化し、空間的に偏りのある交通需要を与えた数値計算によりその特徴を分析した。結果として、SAV の総台数が少なく、回送の必要性があるときには、回送交通の影響により双方向の容量確保が望ましいことや、時間的に集中する需要がシステム最適配分において到着パターンに「ムラ」を生むことがわかった。

本研究の結果は、特に需要が偏在する状況において、従来の交通計画では考慮することのなかった回送交通に対応する計画立案について一定の知見を与える。特に SAV がピーク時の需要の分だけ用意できず回送が必要となる状況では、従来のピーク時の混雑方向だけでなく、逆方向の容量拡張にも資源を割くべきことを示している。双方向に通行できる一般的な道路区間において、需要に応じて車線数などの主要な構造を方向別に偏らせることはもちろん現実的ではない。しかし交差点改良のような事例において、どの交差点のどの枝から容量拡張をすべきか、という意志決定は、方向別に意思決定する（すなわち、需要に応じて特定の枝に対して優先的に投資する）ことはごく一般的である。そのような場合においては、SAV の普及が容量拡張に関する意志決定に大きく影響するようになるだろう。

今後の課題の述べる。本研究ではシステム最適配分を実現する方法については特に触れていない。出発時刻選択問題では最適配分と均衡配分とのあいだに一定の関連があり^{12),13)}、同様の考え方で旅客の行動原理との関連をとる余地はあるかもしれない。また、ボトルネック渋滞におけるオークション制度¹⁴⁾ のような方法は、容量制約条件を記述する線形計画問題で表現される本研究のような問題との整合性もよいと思われる。本研究では需要が偏在する状況を適当な OD 交通量を所与とすることで示した。より一般的かつ堅牢な評価をするのであれば、さまざまな OD 交通量パターンを考慮した分析が望ましい。実務的な研究事例として、例えば Hungness and Bridgelall(2020)¹⁵⁾ では、四段階推定法を用いて、複数地域での自動運転車の影響を分析を行っているものがある。この研究では、自動運転車の混入率増により、当然、走行距離増加と平均速度減少が生じるが、影響は都市の交通ネットワーク形状や人口分布により大きく異なることを示している。SAV の導入にはまだ時間がかかることが想定されるため、道路整備と同様に、OD 交通量パターンを内生的に決定するようにしたり、あるいは多数のパターンを列挙するなどのアプローチが重要となろう。

本研究の枠組みの拡張において方法論的に重要なのは、非線形要素をいかに効率的に組み込むかである。すでに指摘したように、偏り指標の値の一意性の確保には非線形最適化問題を解くことが必要となる。OD 交通量パターンの内性化においても、例えばエントロピーモデルのようなものを用いれば、非線形要素が入ってくることは避けられない。線形計画問題の求解自体は不可能ではないが、提案した問題では、実質的に最短経路探索問題を線形計画問題によって解くような要素も含まれており、一般的なソルバーでの求解はいたって非効率である可能性もある。今回の問題に特化した効率的な解法の開発は、非線形要素の取り込みや、大規模ネットワークでの求解において重要となろう。

謝辞： 本研究成は科学研究費補助金（基盤研究 A）「MaaS + CV 時代の次世代交通システムに向けたインフラと制度の設計（20H00265）」の援助によりなされた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Conway, M. W., Salon, D., and King, D. A.: Trends in taxi use and the advent of ridehailing, 1995–2017: Evidence from the us national household travel survey, *Urban Science*, Vol.2, No.3, pp.79, 2018.
- 2) Wang, H. and Yang, H.: Ridesourcing systems: A framework and review, *Transportation Research Part B*, Vol.129, pp.122–155, 2019.
- 3) Milakis, D., van Arem, B., and van Wee, B.: Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.21, No.4, pp.324–348, 2017.
- 4) Soteropoulos, A., Berger, M., and Ciari, F.: Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies, *Transport Reviews*, Vol.39, No.1, pp.29–49, 2019.
- 5) Castillo, J. C., Knoepfle, D. T., and Weyl, E. G.: Surge pricing solves the wild goose chase, 2018, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2890666>. Accessed on December 15, 2019.
- 6) Xu, Z., Yin, Y., and Ye, J.: On the supply curve of ride-hailing systems, *Transportation Research Part B*, Vol.132, pp.29–43, 2020.
- 7) Xu, Z., Yin, Y., Chao, X., Zhu, H., and Ye, J.: A generalized fluid model of ride-hailing systems, *Transportation Research Part B*, Vol.150, pp.587–605, 2021.
- 8) Zhang, K., Chen, Y., and Nie, Y. M.: Hunting image: Taxi search strategy recognition using sparse subspace clustering, *Transportation Research Part C*, Vol.109, pp.250–266, 2019.
- 9) Shou, Z., Di, X., Ye, J., Zhu, H., Zhang, H., and Hampshire, R.: Optimal passenger-seeking policies on e-hailing platforms using markov decision process and imitation learning, *Transportation Research Part C*, Vol.111, pp.91–113, 2020.
- 10) Urata, J., Xu, Z., Ke, J., Yin, Y., Wu, G., Yang, H., and Ye, J.: Learning ride-sourcing drivers' customer-searching behavior: A dynamic discrete choice approach, *Transportation Research Part C*, Vol.130, pp.103293, 2021.
- 11) Seo, T. and Asakura, Y.: Multi-objective linear optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–13, 2021.
- 12) Iryo, T. and Yoshii, T.: Equivalent optimization problem for finding equilibrium in the bottleneck model with departure time choices, *Mathematics in Transport*, (Ed. by B. G. Heydecker), pp. 231–244, Elsevier, Oxford, 2007.
- 13) Akamatsu, T., Wada, K., Iryo, T., and Hayashi, S.: A new look at departure time choice equilibrium models with heterogeneous users, *Transportation Research Part B*, Vol.148, pp.152–182, 2021.
- 14) Akamatsu, T. and Wada, K.: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity, *Transportation Research Part C*, Vol.79, pp.178–195, 2017.
- 15) Hungness, D. and Bridgelall, R.: Model contrast of autonomous vehicle impacts on traffic, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.2020, 2020.

(Received 2021. 10. 1)

NETWORK DESIGN PROBLEM UNDER UNEVEN DEMAND PATTERN FOR SHARED AUTONOMOUS VEHICLES

Takamasa Iryo and Junji Urata