

多目的線形計画法による 共有型自動運転システムの戦略的設計

瀬尾 亨¹・朝倉 康夫²

¹正会員 東京大学大学院助教 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: seo@civil.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

本論文では、共有型自動運転 (SAV) システムの戦略的設計のためのベンチマークの手法として、SAV システムの運用とインフラ設計を動的交通配分に基づき統一してモデル化し、最適化する手法を提案する。具体的には、SAV システムにおける動的配車配送問題、ライドシェアマッチング問題、フリートサイズ決定問題、道路ネットワーク設計、駐車場配置問題を同時に解く多目的線形計画問題を定式化する。目的関数の要素は旅行者総旅行時間やインフラ整備費用等とし、ユーザー側・システム側両方のコストを考慮する。問題の定性的性質を解析したのち、数値実験により定量的性質を確認した。例えば、本問題ではライドシェアの導入が旅行者、SAV 運行業者、道路整備事業者全ての利便性を向上させることが理論的に保障され、数値的にも確認された。

Key Words: *dynamic SAV assignment, ridesharing, fleet size optimization, network design, parking space allocation*

1. はじめに

共有型自動運転車両 (Shared Autonomous Vehicle: SAV) に基づく交通システムは近い将来に実現する可能性がある^{1), 2)}。SAV システムでは、社会で共有される自動運転車両が最適な経路やライドシェアマッチングで旅行者を輸送することで、旅行者の利便性を大きく損なうことなく車両数やインフラ負担の観点から効率的な交通を実現することが意図されている。

SAV システムの計画設計には様々な種類の問題が含まれる。主要な例を挙げると、動的配車配送問題 (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows: VRPPDTW)^{3), 4)}、動的ライドシェアのマッチング問題⁴⁾⁻⁷⁾、フリートサイズ決定問題^{1), 8), 9)}、道路ネットワーク設計・SAV 車線配置問題¹⁰⁾、駐車場配置問題^{11), 12)}がある。既存研究では、これらの問題は独立して解かれている場合が多い。また、混合整数計画問題やマルチエージェントシミュレーションなどといった計算コストの非常に大きい枠組みや、逆に計算コストは小さいものの動的な交通混雑を表現できない静的な枠組みを用いて定式化されている場合が多い。

本論文では、上記のような SAV システムの運用とインフラ設計問題を動的交通配分 (DTA) に基づき統一してモデル化し、最適化する手法を提案する。これは SAV システムにおける動的配車配送問題 (集計型 VRPPDTW)、動的ライドシェアのマッチング問題、フリートサイズ決定問題、道路ネットワーク設計、駐車場配置問題を同

時に解く多目的最適化問題として定式化される。目的関数の要素は旅行者総旅行時間、車両総走行距離、総 SAV 台数、インフラ整備費用であり、ユーザー側・システム側両方のコストを考慮している。本問題は線形計画問題として定式化されるため、計算効率が良い。本問題のように SAV システムの動的な運用とインフラ設計を同時に最適化する問題は、SAV システムの戦略的設計のためのベンチマークとして重要と考えられる。なぜなら、SAV システムが実現した社会では車両の運用を (今日の交通流と比較し) 動的かつ精密に制御可能であるため、それを考慮したうえでインフラの供給能力を設計することでより効率的な交通システムが実現すると考えられるためである。

なお、本研究で提案する手法は、前述したような SAV システムの個別要素を特化して扱う手法^{1), 3)-12)}の代替となるものではない。本研究の手法は、SAV システム全体を統一かつ見通し良く表現するために各種の近似を導入しているため、個別要素単体の表現力は個別要素を特化して扱う手法と比較し劣っているためである。実際の SAV システムを設計する際には、本研究の手法でシステム全体を大まかに最適化したのち、個別要素をそれぞれを特化して扱う手法で最適化するような方法が有効と想定される。

2. 定式化

(1) 問題設定

基本的な仮定を以下に述べる。社会によって共有される SAV が存在し、任意の旅行者によって利用可能である。SAV の交通は動的交通流モデルによって記述される。この動的交通流モデルは、ノード上で車両が待ち行列を形成するポイントキューモデルである。ノード上での待ち行列長はそのノードの車両待機容量（駐車、停車、道路上の停止を合計したもの）によって制約される。ライドシェアとは、一台の SAV に同時に複数の旅行者が搭乗する形態であり、SAV はライドシェア・非ライドシェアいずれの形態でも用いられうる。旅行者は特定の出発地、目的地、出発時刻、許容最大旅行時間を持つ。旅行者は SAV に乗らなければ移動できず、それ以外の場合はノードにて待機する。

以上の仮定のもと、旅行者の総旅行時間、SAV の総移動距離、総 SAV 台数、総インフラ整備費用を同時に最小化する多目的最適化問題を定式化する。本問題は、旅行者の時間帯別 OD 表が所与のもとで、SAV と旅行者の動的交通量、総 SAV 台数、交通容量、車両待機容量を決定するものである。

(2) 最適化問題

本問題の基本的な考え方を述べる。まず、道路ネットワークを図-1a のように時間拡張ネットワークとし、旅行者と SAV の動的な移動を時間拡張ネットワーク上のフローとしてモデル化する。具体的には、 x_{ij}^t をリンク ij をタイムステップ t に移動する SAV の交通量、 $y_{s,ij}^{k,t}$ をリンク ij をタイムステップ t に移動するクラス s, k (s は出発地、 k は出発タイムステップ) の旅行者の交通量とする。旅行者は SAV に乗らないと移動できないため、 ρ を SAV 一台当たりの乗客容量として条件 $\sum_{s,k} y_{s,ij}^{k,t} \leq \rho x_{ij}^t$ を満たす必要がある。また、 x_{ij}^t はリンク ij の交通容量以下である必要がある。さらに、図-1b、図-1c に示すようにノードでの保存則を満たす必要がある。提案する社会最適 SAV 計画問題の目的は、以上のような制約のもとで社会的に最適な $y_{s,ij}^{k,t}$ や x_{ij}^t などの値を求めることである。

結論を述べると、本問題は以下のように定式化できる。

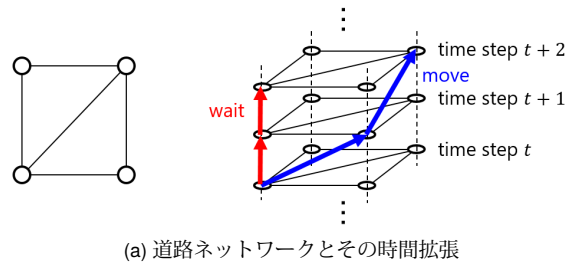
$$[\text{SOSAV}] \quad \min (T, D, N, C) \quad (1)$$

subject to

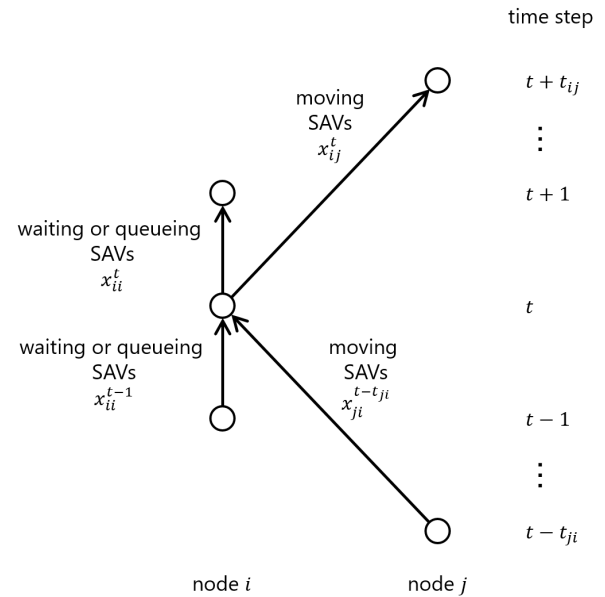
$$\sum_{ij,s,t,k} t_{ij} y_{s,ij}^{k,t} = T \quad (2)$$

$$\sum_{ij,i \neq j} d_{ij} x_{ij}^t = D \quad (3)$$

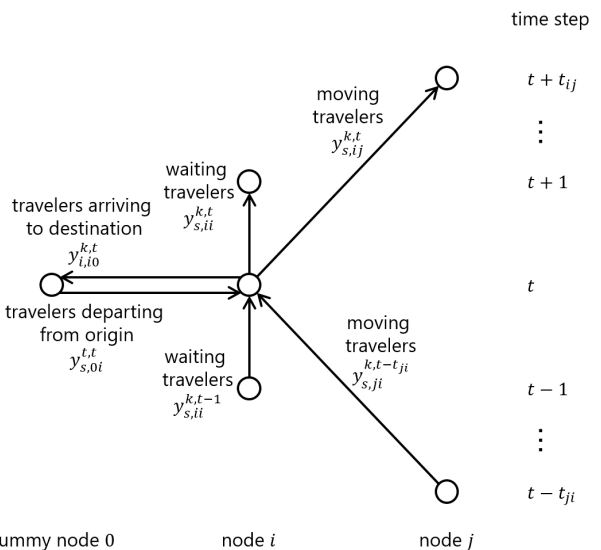
$$\sum_i x_{0i}^0 = N \quad (4)$$



(a) 道路ネットワークとその時間拡張



(b) タイムステップ t 、ノード i における SAV 流保存則



(c) タイムステップ t 、ノード i における旅行者流保存則

図-1: 時間拡張ネットワークを用いた DTA

$$\sum_{ij} c_{ij}(\mu_{ij} - \mu_{ij}^{\min}) + \sum_i c_i(\kappa_i - \kappa_i^{\min}) = C \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j x_{ij}^t = 0 \quad \forall i, t \in (0, t_{\max}) \quad (6)$$

$$\sum_j y_{s,ji}^{k,t-t_{ji}} - \sum_j y_{s,ij}^{k,t} + y_{s,0i}^{k,t} - y_{s,i0}^{k,t} = 0 \quad \forall i, s, k, t \in T_k \quad (7)$$

$$\sum_{s,k} y_{s,ij}^{k,t} \leq \rho x_{ij}^t \quad \forall ij, i \neq j, t \quad (8)$$

$$x_{ij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall ij, i \neq j, t \quad (9)$$

$$x_{ii}^t \leq \kappa_i \quad \forall i, t \quad (10)$$

$$y_{s,0r}^{k,k} = M_{rs}^k \quad \forall rs, k \quad (11)$$

$$\sum_{t \in T_k} y_{s,s0}^{k,t} = \sum_r M_{rs}^k \quad \forall s, k \quad (12)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall ij, t \quad (13)$$

$$y_{s,ij}^{k,t} \geq 0 \quad \forall ij, s, k, t \in T_k \quad (14)$$

$$x_{0i}^0 \geq 0 \quad \forall i \quad (15)$$

$$y_{s,s0}^{k,t} \geq 0 \quad \forall s, t, k \in T_k \quad (16)$$

$$\mu_{ij}^{\min} \leq \mu_{ij} \leq \mu_{ij}^{\max} \quad \forall ij \quad (17)$$

$$\kappa_i^{\min} \leq \kappa_i \leq \kappa_i^{\max} \quad \forall i \quad (18)$$

ここで、記法は表-1の通り。

各制約条件の意味は以下の通り。式(2)は総旅行時間の定義、式(3)は総移動距離の定義、式(4)は総 SAV 台数の定義、式(5)は総インフラ整備費用の定義、式(6)はノードでの車両保存則、式(7)はノードでの旅行者保存則、式(8)は乗客容量制約、式(9)は交通容量制約、式(10)は車両待機容量制約、式(11)は出発地における旅行者需要制約、式(12)は目的地における旅行者需要制約である。

決定変数は全ての適切な i, j, s, k, t についての x_{ij}^t (ライドシェア有り VRPPDTW に相当)、 $y_{s,ij}^{k,t}$ (ライドシェア有り VRPPDTW に相当)、 N (フリートサイズ決定問題に相当)、 μ_{ij} (道路建設・容量拡張・SAV 車線配置問題に相当)、 κ_i (駐車場配置問題に相当) である。これらの変数は [SOSAV] において全て線形関係にあることに注目されたい。よって、[SOSAV] は線形計画問題である。

本問題は T, D, N, C を同時に最適化する社会最適 DTA 問題である。その交通流モデルは、ノード上での待ち行列形成と vehicle holding を許し、待ち行列長に制約があるポイントキューモデルである。そのため、仮に渋滞が発生する場合、リンク上は自由流状態のままであるが、ノード上で待ち行列、すなわち渋滞が発生する。このとき、ノード上の待ち行列が制約上限に達し

表-1: 基本的な数学記法

x_{ij}^t	リンク ij をタイムステップ t に移動開始する SAV の交通量
$y_{s,ij}^{k,t}$	リンク ij をタイムステップ t に移動開始する出発地 s 、出発タイムステップ k の旅行者の交通量
T	旅行者の総旅行時間 (ノード上の待ち時間を含む)
D	SAV の総移動距離
N	総 SAV 台数
C	総インフラ整備費用
t_{ij}	$i \neq j$ のとき、リンク ij の自由旅行時間
t_{ii}	ノード i で 1 タイムステップ分待つ待ち時間 (=タイムステップ幅)
d_{ij}	リンク ij の長さ
c_{ij}	リンク ij の交通容量拡張コスト
c_i	ノード i の車両待機容量拡張コスト
ρ	SAV 一台当たりの乗客容量
μ_{ij}	リンク ij の交通容量
κ_i	ノード i の車両待機容量
μ_{ij}^{\max}	リンク ij の交通容量の取りうる最大値
κ_i^{\max}	ノード i の車両待機容量の取りうる最大値
μ_{ij}^{\min}	リンク ij の交通容量の取りうる最小値
κ_i^{\min}	ノード i の車両待機容量の取りうる最小値
M_{rs}^k	出発地 r 、目的地 s 、出発タイムステップ k の時間帯別 OD 表
T_k	出発タイムステップ k の旅行者が移動できるタイムステップ集合
t_{\max}	最終タイムステップ

た場合、「そのノードに流入し待ち行列長を伸ばしうるリンク」への流入に制約がかかる。よって、Kinematic Wave 理論^{13), 14)}の考え方にある程度¹整合的な形で動的な交通渋滞を表現しているといえる。また、ノード上での待ち行列長制約は式(10)で表現されている。車両待機容量 κ_i は駐車、停車、渋滞中の待ち車両の合計にかかる制約であり、それらを区別していない。

本問題は、Ziliaskopoulos¹⁵⁾の線形計画による社会最適 DTA 問題や、安藤ら¹⁶⁾、奥村ら¹⁷⁾、Kuwahara et al.¹⁸⁾等の線形計画による最適避難問題に大幅な変更を加えたものとみなせる。愛甲ら⁴⁾の混合整数線形計画による非集計ライドシェア最適化問題を連続化したものともみなせる。本モデルの欠点としては、ノードでの待機車両の内訳(駐車、停車、渋滞中の待ち車両)を区別していない点、first-in first-out が保証されない点、 ρ を

¹ first-in first-out は保証されないので、Kinematic Wave 理論と完全には整合的でない。

固定している点、パスフローや個別の旅行者・SAV のパスは直接は計算できない点、旅行者の乗り換えを区別できない点が挙げられる。

(3) 解の性質

多目的最適化問題は、そのパレートフロンティアを求めれば解けたといえる¹⁹⁾。パレートフロンティアとは全てのパレート効率解の集合であり、パレート効率解とはどの目的関数の値も他の目的関数の値を悪化させることなく改善できない解と定義される。[SOSAV] は多目的線形計画問題であるので、そのパレートフロンティアは T - D - N - C 空間上の実行可能領域の下側包絡線である (図-2a)。なお、実際に SAV システムの実装をする際には、政策上最も有効なパレート効率解をパレートフロンティアから選択することになるだろう。

[SOSAV] の定性的性質として、社会最適状態のライドシェアは社会の様々な会員にとって望ましいという点がある。すなわち、[SOSAV] では、乗客容量 ρ を増加させた場合、総旅行時間 T 、総走行距離 D 、総 SAV 台数 N 、総インフラ建設費用 C の全てを同時にかつ単調に減少させられる。これは正確には以下の数学的定理として表現できる。

定理 1. 全ての $\rho_2 > \rho_1 > 0$ について、 $\rho = \rho_1$ とした [SOSAV] の全てのパレート効率解について、より弱効率的な解が $\rho = \rho_2$ とした [SOSAV] に存在する。

証明. 問題 [SOSAV] 中では、 ρ は式 (8) にのみ表れる。式 (8)、(13)、(14) より、 $y_{s,ij}^{k,t}$ と x_{ij}^t の実行可能領域は ρ について単調に拡大 (すなわち、上限が広義単調増加し、下限が広義単調減少) する。よって、 T, D, N, C の実行可能領域も ρ について単調に拡大する。よって、パレートフロントの定義 (すなわち、実行可能領域の下側包絡線) と、[SOSAV] が最小化問題である事実より、本定理は成り立つ。□

図-2b に本定理の概念図を示す。なお、現実的なデータのもとでは乗客容量制約 (8) はほぼ常にアクティブであると考えられるため、 ρ を増加させれば T, D, N, C の最適値はほぼ常に改善できるといえる。

(4) 数値解法

[SOSAV] は、その線形性により効率的に解ける。例えば、目的関数をスカラー化する加重合計法のような単純な解法や、多目的シンプレックス法のような効率的な解法が適用可能である¹⁹⁾。さらに、交通問題としての構造に着目し、Kuwahara et al.¹⁸⁾ で提案されているような目的別に分解する解法も適用可能と考えられる。一般の多目的計画問題は求解困難な場合が多いことを考えると、これらの性質は本問題の長所といえる。

本論文では、単純な加重合計法を数値解法として用いる。本手法は、以下の単一目的最適化問題を繰り返して解いてパレートフロンティアを近似的に求める。

$$[\text{SOSAV-WS}] \quad \min \alpha_T T + \alpha_D D + \alpha_N N + \alpha_C C \quad (19)$$

subject to (2)–(18), ただし各 α は所与の正定数であり、それぞれの目的関数の優先度を重み付けして表現したものである。[SOSAV] の線形性により、[SOSAV-WS] の解は必ず [SOSAV] のパレート効率解であり、また [SOSAV] のパレート効率解は必ず適切な α のもとでの [SOSAV-WS] の解になることが知られている。そのため、異なる α のもとで [SOSAV-WS] を繰り返し解けば [SOSAV] のパレートフロンティアの概形を求められる。

[SOSAV-WS] の決定変数のうち大多数を占めるのは $y_{s,ij}^{k,t}$ である。 $y_{s,ij}^{k,t}$ の総数は J をノード数、 S をタイムステップ数とすると $O(J^2 S)$ である。そのため、[SOSAV-WS] を内点法で解く場合の最悪計算量は $O(J^7 S^{3.5})$ となる。

3. 数値実験

(1) 実験設定

仮想的なシナリオに基づく数値実験により [SOSAV] の性質を確認する。10 個のノードが一行に並んだ一次元仮想都市において、20 タイムステップ中に 1000 の旅行者がおおむね一方向に移動する通勤行動を考える。この場合、[SOSAV-WS] の求解時間は通常のノートパソコン上で 1 秒未満であった。

比較のために自動車が完全個人保有されている場合の最適配車等も求める。これは各旅行者が専用の車両を保有し、ライドシェアは禁止し、車両が走行するには旅行者が乗車していなければならないとしたモデルで、[SOSAV] の簡単な変形として定式化できる。

(2) 結果

図-3 に [SOSAV] のパレートフロンティアの例を示す。なお、結果を 2 次元で表現するため、 C と D は適当な値に固定している。また、表-2 に [SOSAV-WS] の解の例を示す。これらでは、非ライドシェア SAV、2 人乗りライドシェア SAV、完全個人保有の場合の結果を示している。 T と N のトレードオフ関係や定理 1 で示したライドシェアの効果が定量的に確認できる。完全個人保有と比較した場合、SAV は非ライドシェアのときは T が等しいか大きくなってしまふ、すなわち旅行者には時間的な利益とならないが、ライドシェアを導入すれば T も減少させられることがわかる。

図-4 に、パレート効率解における旅行者と SAV の交通量を時空間図として示す。ここで、縦軸は時間を意味

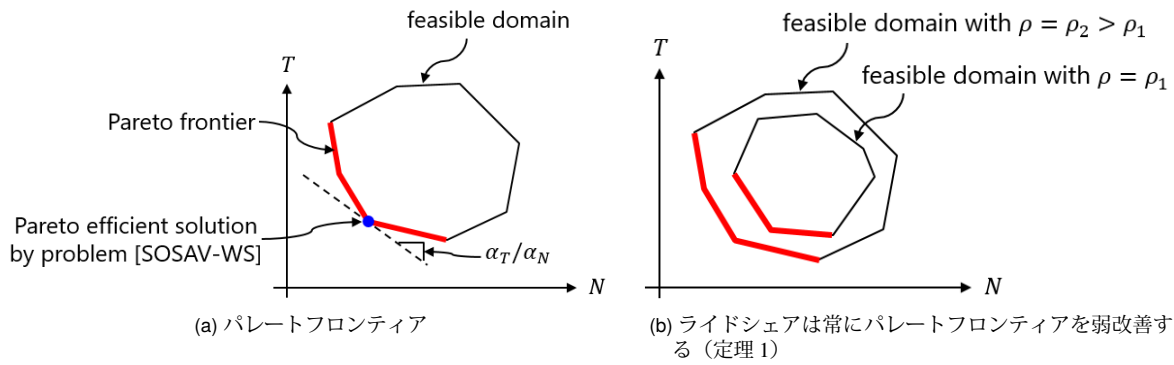


図-2: 多目的最適化問題とパレートフロンティア (なお, 便宜上 2 次元空間を用いて簡略化して表現しているが, 実際の目的関数の実行可能領域は 4 次元である)

表-2: 異なる車両利用形態のもとでのパレート効率解

車両利用形態	入力	出力			
	$(\alpha_T, \alpha_D, \alpha_N, \alpha_C)$	T	D	N	C
完全個人保有	(1, 1, 10, 10)	6143	3399	1000	853
SAV, 非ライドシェア ($\rho = 1$)	(1, 1, 10, 10)	7577	4462	307	237
SAV, 2 人乗りライドシェア ($\rho = 2$)	(1, 1, 10, 10)	6105	2054	199	80
SAV, 非ライドシェア ($\rho = 1$)	(5, 1, 10, 10)	5021	4658	494	745
SAV, 2 人乗りライドシェア ($\rho = 2$)	(5, 1, 10, 10)	4128	2104	333	375

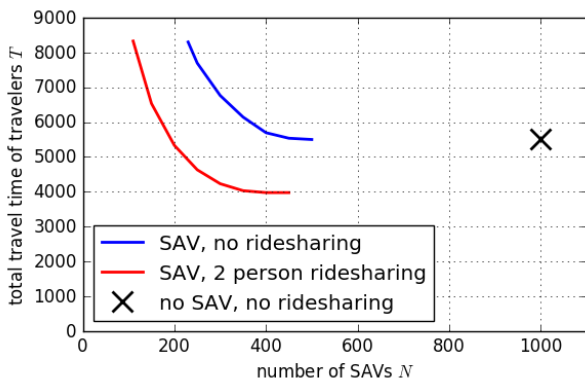


図-3: N と T についてのパレートフロンティア

し上ほど将来であり, 横軸は空間を意味し設定した一次元都市の構造と対応している. 線の太さは交通量の多さ, 斜め方向の実線はリンクを移動する交通量, 縦方向の破線はノードで待機する交通量, 赤線は交通容量もしくは乗車容量に達した交通量, 青数字は流入交通量, 緑数字は流出交通量を意味する. 図-4a と 図-4b はともに同一の OD 表に基づいており, 旅行者はおおむね左から右に移動する傾向を持っている.

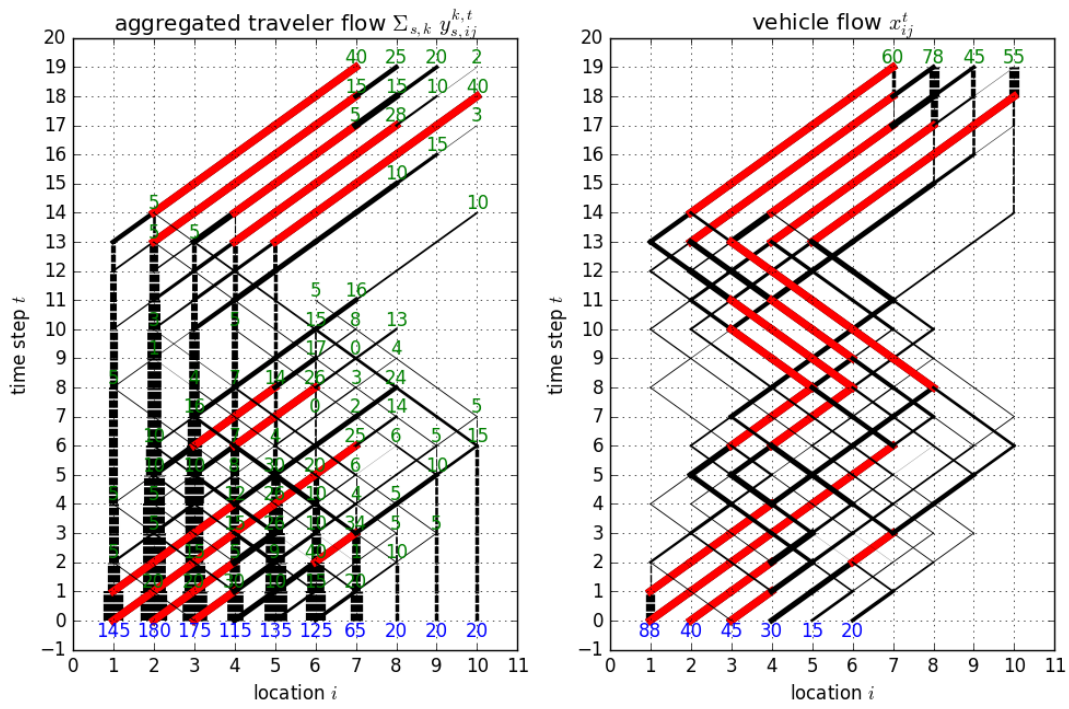
図-4a は非ライドシェア SAV の場合であり, 飽和状態にある道路リンクが多い. その結果, 旅行者は移動を

開始できるまでに時間がかかり, 出発地ノードで待機する時間が長くなっている. 一方, 図-4b はライドシェア SAV の場合であり, 図-4a と比較して飽和状態にある道路リンクが非常に少ない. その結果, 旅行者は比較的短時間で移動を完了できている. よって, 本モデルは動的なライドシェア交通流の性質をうまく表現できているといえる.

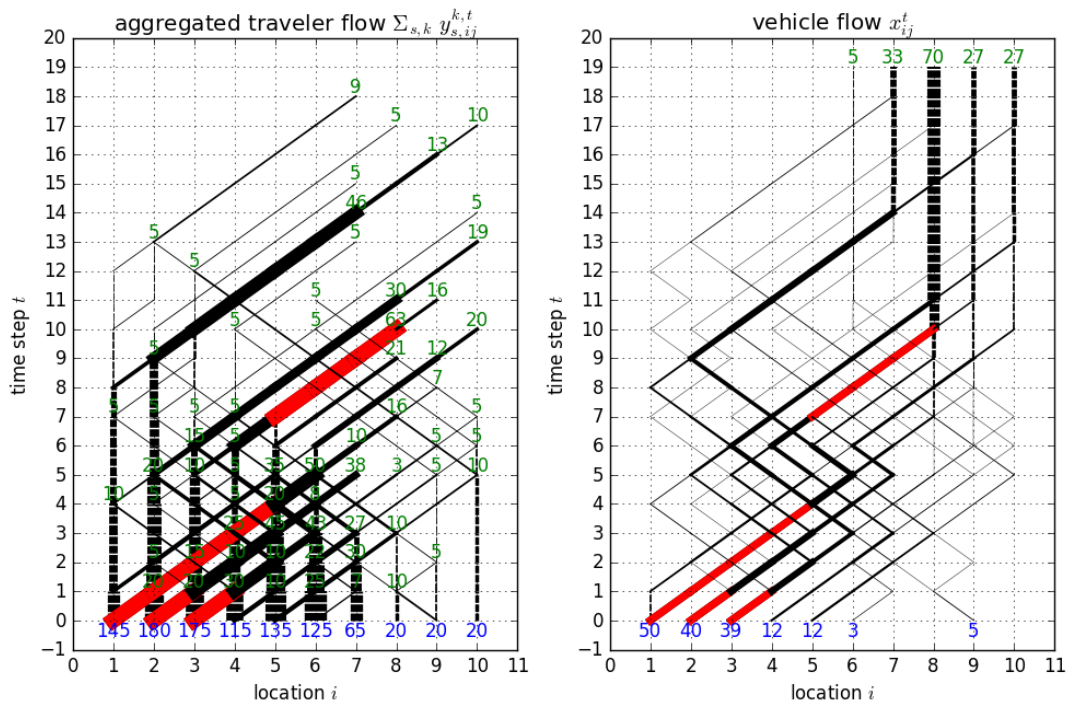
4. おわりに

本論文では, 旅行者の総旅行時間, SAV の総移動距離, 総 SAV 台数, 総インフラ整備費用を同時に最小化する多目的線形計画問題を定式化した. その定性的性質を解析したのち, 数値実験により定量的性質を確認した. 本問題の重要な性質として, ライドシェアの導入が旅行者, SAV 運行业者, 道路整備事業者全ての利便性を向上させると理論的に保障されている点が挙げられる.

今後の課題には以下が考えられる. まず, 実データに基づく大規模なケーススタディへの適用が必要である. 本問題の加重合計法による計算効率は多項式時間ではあるものの次数が大きいため, 大規模な問題に適用するにはより効率的な解法を用いる必要がある. これに際しては Kuwahara et al.¹⁸⁾ の分解アプローチが有用



(a) SAV, 非ライドシェア ($\rho = 1$)



(b) SAV, 2人乗りライドシェア ($\rho = 2$)

図-4: 旅行者 (左) と SAV (右) のフローの時空間図

であろう。また、乗客容量 ρ を決定変数とし、SAV のコストを乗客容量に依存する内生変数とした拡張も考えられる。この場合、制約式 (8) が非線形になるので、線形計画の枠組みからは外れる。さらに、本論文では旅行者や SAV 事業者の利益最大化行動を無視していた

が、社会最適を達成するための方策の分析も重要である。旅行者に対する方策の分析に際しては、本問題の解を交通システムの供給能力として捉えれば、出発時刻選択問題に対する最適課金問題^{20)–22)}の知見が活用できると期待される。SAV 事業者に関連し、近年のライ

ドシェア・ライドソーシングサービスでは駐車、停車、空車回送のマネジメントとそれが都市交通に与える影響(例:空走による渋滞悪化)が問題になっている。これらのコストを本問題の目的関数中でモデル化すれば、最適なマネジメントを導出できるようになると考えられる。

参考文献

- 1) Fagnant, D. J. and Kockelman, K. M.: Dynamic ride-sharing and optimal fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles, in *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- 2) 紀伊雅敦, 横田彩加, 高震宇, 中村一樹: 共有型完全自動運転車両の普及に関する基礎分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_507-I_515, 2017.
- 3) Mahmoudi, M. and Zhou, X.: Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state-space-time network representations, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 89, pp. 19-42, 2016.
- 4) 愛甲聡美, Thaithakul, Phathinan, 瀬尾亨, 朝倉康夫: アクティビティパターンを与件としたライドシェア車両の最適割り当て問題, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_1233-I_1242, 2017.
- 5) Regue, R., Masoud, N., and Recker, W.: Car2work: Shared mobility concept to connect commuters with workplaces, *Transportation Research Record*, Vol. 2542, No. 1, pp. 102-110, 2016.
- 6) Levin, M. W., Kockelman, K. M., Boyles, S. D., and Li, T.: A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 64, pp. 373-383, 2017.
- 7) Thaithakul, P., Seo, T., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Evolution of a dynamic ridesharing system based on rational behaviour of users, *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 13, No. 8, pp. 614-626, 2019.
- 8) Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., and Ratti, C.: Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 37, pp. 13290-13294, 2014.
- 9) Vazifeh, M. M., Santi, P., Resta, G., Strogatz, S. H., and Ratti, C.: Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility, *Nature*, Vol. 557, pp. 534-538, 2018.
- 10) Chen, Z., He, F., Zhang, L., and Yin, Y.: Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 72, pp. 143-156, 2016.
- 11) Nourinejad, M., Bahrami, S., and Roorda, M. J.: Designing parking facilities for autonomous vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 109, pp. 110-127, 2018.
- 12) 香月秀仁, 東達志, 高原勇, 谷口守: シェア型自動運転交通"Shared-adus"導入による駐車時空間削減効果, 都市計画論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 544-550, 2018.
- 13) Lighthill, M. J. and Whitham, G. B.: On kinematic waves. II. a theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 229, No. 1178, pp. 317-345, 1955.
- 14) Richards, P. I.: Shock waves on the highway, *Operations Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51, 1956.
- 15) Ziliaskopoulos, A. K.: A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Science*, Vol. 34, No. 1, pp. 37-49, 2000.
- 16) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時空間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 5, pp. I_683-I_694, 2016.
- 17) 奥村誠, 片岡侑美子, 金進英: 津波遭遇リスクを最小化する自動車避難最適化モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_1083-I_1092, 2017.
- 18) Kuwahara, M., Ohata, T., and Oishi, Y.: Normative behaviour-based first-best analysis for disaster evacuation, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2017.
- 19) Ehrgott, M.: *Multicriteria Optimization*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- 20) Vickrey, W. S.: Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, pp. 251-260, 1969.
- 21) Seo, T. and Yin, Y.: Optimal pricing for departure time choice problems with unknown preference and demand: Trial-and-error approach, in *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*, 2019.
- 22) Iryo, T., Smith, M. J., and Watling, D.: Stabilisation strategy for unstable transport systems under general evolutionary dynamics, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019.

(2020. 3. 8 受付)

Linear programming for optimal design of shared autonomous vehicle system

Toru SEO and Yasuo ASAKURA