

経路選択基準を考慮した交通量配分モデル

環境社会基盤工学分野
都市交通研究室
松尾 海杜
指導教員：加藤 哲平

1. 背景と目的

近年、自動運転技術は急速に発展し、自動運転を導入することで交通流の効率化が期待されている。また、将来的には完全自動運転が交通ネットワークに大きな変化をもたらすと考えられる。世界に目を向けると、アメリカでは自動運転タクシーが導入されている¹⁾ほか、中国では自動運転バスが公共交通機関として利用される²⁾など、他国では日本より高いレベルで自動運転の社会実装が進んでいる状況である。日本国内では、政府が2025年を目標に自家用車は、高速道路上での自動運転レベル4の実現、そして、物流・サービスは、2025年以降を目標に高速道路上での自動運転レベル4の実現を目指している（国土交通省2023³⁾）。政府はこの目標の実現に向け、新東名高速道路において、自動運転車専用レーンを活用したトラックの自動運転実証実験を進めており、その普及が具体化しつつある。しかし、政府の目標にもあるように、自動運転レベル4の導入は、歩行者や自転車の侵入がない高規格道路（自動車専用道）から優先される。一方で、歩行者や自転車が存在する低規格道路での自動運転レベル4の導入は、技術革新が進んだとしても、数年後の未来に実現する可能性は低いと考えられる。つまり、自動運転というソフト的な技術の発展とそれに対応したハードの整備にはタイムラグが存在すると思われる。

したがって、自動運転車普及過渡期では、道路種別によって経路選択行動が異なる状況が生じると考えられる。

次に、自動運転車（以下、AV）が導入されることによる交通ネットワークへの影響について考える。その影響は、ミクロな側面とマクロな側面の二つに分けられる。まずミクロな側面として、AVは車間・路車間通信が可能になることで、交通容量の増加が見込まれる。よって、ミクロな交通制御を行うことで効率的な交通流状態を達成することが可能であると考えられる。しかし、このようなミクロな交通制御を前提とした研究が行われているものの、ミクロな制御のみでは交通ネットワーク全体としては限定的な効果しか生まないことが示されている（A. Talebpour et al

2017⁴⁾）。一方でマクロな側面として、AVの普及が進むにつれ、経路選択といったよりマクロな制御が可能になると考えられる。具体的には、AVの経路を中央集権的に誘導することによって、ネットワーク全体の効率化を図るような施策が考えられる。また、完全自動運転の環境下では、人々が移動時間中に他の活動を行うことが可能となるため時間価値が低下し、利用者の移動時間に対する感度が低下すると考えられる。したがって、経路誘導施策への受容性が高まると考えることができる。以上を踏まえ、ネットワークの効率化を考える上では、マクロな施策を前提とした交通流予測について議論の余地がある。

以上より、自動運転車普及過渡期における道路施策を検討するためには、経路誘導を考慮した交通量配分モデルの構築が必要となる。そこで次に、関連する既往研究を整理する。自動運転導入を考慮した交通量配分モデルに関する研究は大きく二つに分類される。

一つは、同一ネットワーク上で自動運転車と手動運転車が混在する状況を扱う研究であり、Morandi (2024)⁵⁾や Wang et al. (2019)⁶⁾が挙げられる。これらの研究では、車両種別ごとに異なる経路選択基準を導入した均衡配分モデルが提案されている。しかし、空間的にエリアを分離し、エリアごとに異なる行動原理を適用する状況は想定していない。

もう一つは、自動運転エリアと手動運転エリアをエリア別に考え、エリアごとに経路選択が異なる状況を想定した研究で、Roy et al. (2021)⁷⁾や Chen et al. (2017)⁸⁾が挙げられる。これらの研究は、本研究が想定する状況に近い。しかし、自動運転エリア内のコストを平均値や最小値として仮想リンクに置き換えるなど、利用者が実際に経験する移動時間を考慮していない仮定が含まれている。したがって、厳密な均衡状態を表現しているとは言えない。

以上を踏まえ本研究では、高規格道路においては完全自動運転が適用され、オペレーターによる経路誘導が行われる一方、低規格道路では、ドライバーによる経路選択が行われるフェーズにおける交通流を予測し、適切な道路施策の在り方につ

いて検討することを目的とする。

2. モデルの定式化

2.1 記号の説明

本研究では以下の記号を使用する。また、複数の都市内ネットワーク $h(\in H)$ を想定し、各都市内ネットワークにリンク集合やノード集合を定義する。以下では、添字 h を付した記号は都市内ネットワーク h に固有の集合を、添字のない記号はそれらを統合した全体集合を表す。

OD 需要に関する記号

W : OD ペア集合

q_{rs} : OD ペア $rs(\in W)$ 間における交通需要

都市内ネットワークに関する記号

W : OD ペア集合

q_{rs} : OD ペア $rs(\in W)$ 間における交通需要

H : 都市内ネットワーク集合

A_{in}^h : 都市内ネットワーク $h(\in H)$ における
リンク集合

A_{in} : 都市内ネットワークにおけるリンク集合

i.e., $A_{in} = \bigcup_{h \in H} A_{in}^h$

A_{vir}^h : 都市内ネットワーク $h(\in H)$ における
仮想リンク集合

A_{vir} : 都市内ネットワークにおける
仮想リンク集合, i.e., $A_{vir} = \bigcup_{h \in H} A_{vir}^h$

E^h : 都市内ネットワーク $h(\in H)$ における
ゲートノード集合

E : 都市内ネットワークにおけるゲートノード集合
i.e., $E = \bigcup_{h \in H} E^h$

e_n^h : 都市内ネットワーク $h(\in H)$ における n 番目の
ゲートノード $n \in \mathbb{N}$

N_{in}^h : 都市内ネットワークにおけるノード集合
(ゲートノードを除く)

N_{in} : 都市内ネットワークにおけるノード集合
(ゲートノードを除く), i.e., $N_{in} = \bigcup_{h \in H} N_{in}^h$

都市間ネットワークに関する記号

A_{out} : 都市間ネットワークにおけるリンク集合

N_{out} : 都市間ネットワークにおけるノード集合
(ゲートノードを除く)

2.2 問題設定

2.2.1 仮定

本研究における交通量配分モデルの定式化にあたり、以下の仮定を設ける

仮定 1 :

対象とするネットワークは、高規格道路で構成される都市間ネットワークと、低規格道路で構成される都市内ネットワークの二層で構成されていて、両ネットワークは図 1 緑色で示されるゲートノードを介して接続されている。

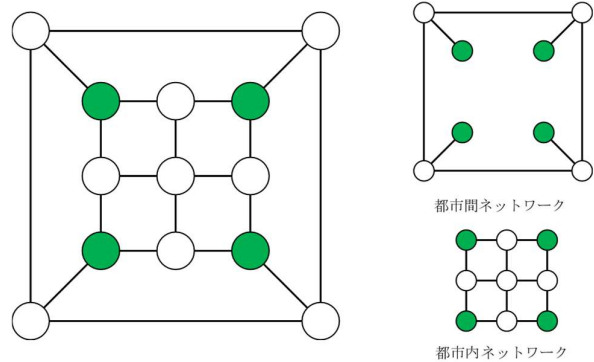


図 1 2層構造ネットワーク

仮定 2 :

ネットワーク内を走行する車両はすべて AV であり、自動運転モードと手動運転モードの切り替えが可能である。都市間ネットワークでは自動運転モードで走行し、都市内ネットワークでは手動運転モードに切り替えて走行する。ただし、本研究では、都市内ネットワークにおいて、ドライバーによる手動運転が行われ、利用者は自身が認知する移動時間に基づいて経路を選択する。この経路選択行動は、移動時間に対する認知誤差を考慮した確率的利用者均衡に従うものとする。一方で、都市間ネットワークにおいては、全車両が完全自動運転を行い、オペレーターによる中央集権的な経路制御が実施される。このとき、オペレーターは、ネットワーク全体の総旅行時間を最小化することを目的とした経路誘導を行う。

以上の仮定より、本研究では、高規格道路と低規格道路が併存する道路ネットワークを対象とした交通量配分モデルを構築する。低規格道路においては、利用者の移動時間に対する認知誤差を考慮した確率的利用者均衡状態が成立すると仮定する。一方で、自動運転エリアにおいては、低規格道路の利用者行動を満たす均衡条件を制約とした上で、ネットワーク全体の総旅行時間を最小化するような経路誘導を行う。

2.2.2 仮想リンクの導入

本研究では、都市内ネットワークにおける確率的利用者均衡配分の結果を都市間ネットワークの

最適化問題に効率的に組み込むため、「仮想リンク」および「仮想ネットワーク」を導入する。前節の仮定に基づくと、本問題は都市間ネットワークと都市内ネットワークが相互に依存する構造を持つ。特に確率的利用者均衡条件は非線形性が強く、大規模なネットワーク全体で解くことは計算負荷の観点から困難である。そこで本研究では、都市内ネットワークの複雑なリンク構造をそのまま最適化問題に組み込むのではなく、ゲートノード間のコストを「期待移動費用」として表現し直すアプローチをとる。具体的には、図2にあるように、あるゲートノード OD ペア間に存在する都市内ネットワークの期待移動費用を、単一のリンクコスト関数として表現したものを「仮想リンク」と定義する。確率的利用者均衡モデルにおいて、利用者の期待移動費用（以下、ログサム）はログサム変数として導出される。このログサム値は、都市内ネットワークにおける複数経路の移動費用を、利用者の確率的経路選択行動を考慮した形で集約した指標であり、都市内への流入交通量に依存して変動する関数である。図4左図に示す、実ネットワークにおける都市内ネットワーク上のリンクを仮想リンクに縮約したネットワークを図3に示すような「仮想ネットワーク」とする。

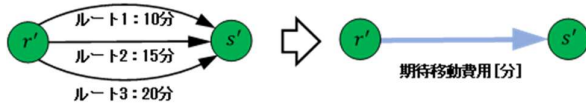


図2 仮想リンク

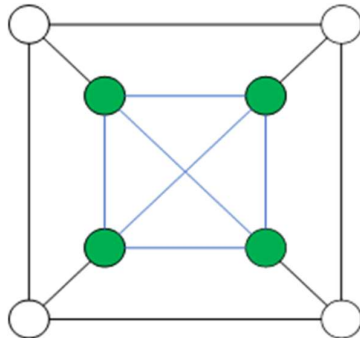


図3 仮想ネットワーク

2.3 交通量

本節では、実ネットワークおよび前節で導入した仮想ネットワークについて、交通量の定義を行う。実ネットワークは、有向グラフ $G(N_{in}^h \cup E^h, A_{in}^h)$ として表現される。一方、仮想ネットワークは有向グラフ $G(N_{out} \cup E, A_{out} \cup A_{vir})$ として定義される。

初めに、仮想ネットワークについて考える。仮想ネットワークにおいて、以下に示す交通量保存則が満たされている。

$$q_{rs} = \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs}, \forall rs \in W \quad (1)$$

ここで、 K_{rs} は仮想ネットワーク内のODペア rs 間の経路集合を、 f_k^{rs} は仮想ネットワーク内のODペア rs 間の k 番目の経路の交通量を表わす。また、仮想ネットワークにおけるリンク交通量は、各経路の交通量の総和であり、以下のように与えられる。

$$x_a = \sum_{rs \in W} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{rs,k,a}, \forall a \in (A_{out} \cup A_{vir}) \quad (2)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, \forall (r,s) \in W \quad (3)$$

$$\delta_{rs,k,a} = \begin{cases} 1 & \text{リンク } a \text{ が仮想ネットワーク上の} \\ & \text{OD ペア } rs \text{ 間の経路 } k \text{ 上に存在している} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

次に、都市内ネットワーク $h \in H$ について考える。ゲートノード集合 E^h の全ゲートノードペアを都市内ネットワーク h のゲートノード OD ペアとし、 W^h を都市内ネットワーク h のゲートノード OD ペア $r's' \in W^h$ 集合とする。ここで、仮想ネットワークにおいて決定される仮想リンク交通量は、都市内ネットワークへの流入交通量として解釈され、各都市内ネットワークにおける OD 需要を決定する。

$$q_{r's'}^h = \sum_{a \in A_{vir}^h} x_a \delta_{r's',a}^h \quad \forall r's' \in W^h, h \in H \quad (4)$$

$$\delta_{r's',a}^h = \begin{cases} 1 & \text{リンク } a \text{ の始点ノード } r' \text{ および} \\ & \text{終点ノード } s' \text{ が含まれる場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

仮想ネットワークと同様に、都市内ネットワークの交通量は以下の条件を満たす。

$$q_{r's'}^h = \sum_{k' \in K_{r's'}^h} f_{r's',k'}^h, \forall r's' \in W^h \quad (5)$$

$$f_{r's',k'}^h \geq 0 \quad \forall k' \in K_{r's'}^h, \forall (r',s') \in W^h \quad (6)$$

$$x_{a'} = \sum_{r's' \in W^h} \sum_{k \in K_{r's'}^h} f_{r's',k}^h \delta_{r's',k',a'}^h, \forall a \in A_{in}^h \quad (7)$$

$$\delta_{r's',k',a'}^h = \begin{cases} 1 & \text{リンク } a' \text{ が経路 } k' \text{ 上に存在している} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

ここで、 $K_{r's'}^h$ はゲートノード OD ペア $r's' \in W$ 間の経路集合； $f_{r's',k'}^h$ は経路 $k' \in K_{r's'}^h$ の交通量； $x_{a'}$ はリンク $a' \in A_{in}^h$ の交通量を表す。

2.4 都市内ネットワークと確率的利用者均衡

本節では、都市内ネットワークにおける交通量

配分を確率的利用者均衡の枠組みで定式化する。なお、本研究においてゲートノード間 OD ペアの交通需要は内生的に決定されるが、本節では後述の式(12)により与えられるものとして扱う。

2.4.1 都市内ネットワークのコスト

本項では、都市内ネットワークのリンクコストについて考える。都市内ネットワークにおける経路移動費用は、リンク移動時間の総和として与えられ、式(8)を満たすものとする。また、リンク a の移動時間 $t_a(x_a)$ は BPR 関数によって表現されると仮定する。したがって、リンク移動時間と経路移動時間は以下で与えられる。

$$c_{r's',k'}^h(\mathbf{f}_{r's'}^h) = \sum_{a' \in A_{in}^h} t_{a'}(x_{a'}) \delta_{r's',k',a'}^h \quad (8)$$

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right) \quad \forall a \in (A_{out} \cup A_{vir}) \quad (9)$$

t_a はリンク a の旅行時間、 t_a^0 は自由流旅行時間、 c は交通容量、 α, β は BPR 関数のパラメーターをそれぞれ表す。

2.4.2 相補性問題

仮定 3 に基づき、都市内ネットワークの交通流は、ドライバーの認知誤差を考慮した確率的利用者均衡状態にあると定義する。本研究では、経路選択確率がロジットモデルに従うと仮定する。このとき、都市内交通流の均衡状態は、式(10)-(11)に示す非線形相補性問題 (Nonlinear Complementarity Problem) として定義できる。また、NCP 問題は、確率的利用者均衡についてクンタッカー条件を解くことで導出される⁹⁾。

$$\begin{aligned} & \left(c_{r's',k'}^h(\mathbf{f}_{r's'}^h) + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{r's'} - \lambda_{r's'}^h \right) \cdot f_{r's',k'}^h = 0 \\ & c_{r's',k'}^h(\mathbf{f}_{r's'}^h) + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{r's'} - \lambda_{r's'}^h \geq 0, f_{r's',k'}^h \geq 0 \quad (10) \\ & \quad \forall k' \in K_{r's'}^h, \forall r's' \in W^h, h \in H \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{k' \in K_{r's'}^h} f_{r's',k'}^h - q_{r's'} \right) \cdot \lambda_{r's'}^h = 0 \\ & \sum_{k' \in K_{r's'}^h} f_{r's',k'}^h - q_{r's'} \geq 0, \lambda_{r's'}^h \geq 0 \quad (11) \\ & \quad \forall k' \in K_{r's'}^h, \forall r's' \in W^h, h \in H \end{aligned}$$

ここで、 θ はロジットモデルの分散パラメーター、 $\lambda_{r's'}^h$ はゲートノード OD ペア $r's' \in W^h$ におけるログサムを表している。

2.5 システム最適化配分

本節では、仮想ネットワーク上における交通量配分について考える。仮想ネットワークでは、仮定 4 に基づき、システム全体の移動費用が最小化

されるような交通量配分 (システム最適化配分) を行う。ネットワーク全体の交通量配分は、以下に示すシステム最適化配分モデルによって表現されると仮定する。

$$\min \sum_{a \in A_{out}} x_a t_a(x_a) + \frac{1}{\theta} \sum_{r's' \in W'} q_{r's'} H_{r's'}(\mathbf{f}^{r's'}) \quad (12)$$

$$H_{r's'}(\mathbf{f}^{r's'}) = - \sum_{r's' \in W'} \sum_{k' \in K'} \frac{f_{k'}^{r's'}}{q_{r's'}} \ln \frac{f_{k'}^{r's'}}{q_{r's'}} \quad (13)$$

Subject to (1)-(7), (10), and (11).

$H_{r's'}$ はエントロピーを表している。なお、目的関数の第 2 項は、エリア内におけるゲートノード間のログサムを表し、前節で示した $\lambda_{r's'}^h$ に等しい。また、エントロピー項 (第 2 項) は、確率的利用者均衡下で定義されるログサムを、目的関数を通じてモデルに組み込むための表現である。

以上より、この問題は制約条件に前節で定式化した確率的利用者均衡モデルの NCP 問題が含まれている。つまり、この問題は均衡制約付き最適化問題 (MPEC) である。この MPEC を解くことにより、都市内ネットワークの確率的利用者均衡状態を前提とした経路誘導に基づく交通量配分結果が得られる。ここで、本モデルでは、ゲートノード OD 需要を外生的に与えるのではなく、仮想ネットワークに対するシステム最適化配分問題を解くことにより内生的に決定している。定式化した目的関数 (式(12)) には、前述の通り都市間ネットワークにおける総旅行時間に加えて、都市内ネットワークの確率的利用者均衡に基づくログサム項が含まれている。これにより都市内への流入交通量と都市間の経路誘導が同時に決定される構造となっている。具体的には、都市内ネットワークにおける確率的利用者均衡条件は制約条件としてモデルに内包されており、その結果としてログサムが、仮想リンクのコストを通じてシステム最適化配分に反映される。このため、ゲートノード間 OD 需要は、都市内ネットワークの混雑状況および利用者の経路選択行動と整合的に決定される。すなわち、本モデルでは、都市内ネットワークの利用者均衡行動を前提としつつ、ネットワーク全体の観点から最適な交通量配分と都市内への流入需要が同時に求められる。

3. 数値実験

本章では、第 3 章で構築した交通量配分モデルの挙動および有用性を数値実験により検証する。提案モデルは非線形最適化問題として定式化されており、本数値実験における均衡解は本モデルの特性上、初期値に依存する可能性があるため、複数の初期値から計算を行い、得られた解のうち総

旅行時間が最小となったものを最適解として採用する。本章では、各実験におけるシナリオおよびネットワーク設定のもとで得られた最適解を用いて、モデルの特性を分析する。ここで、本数値実験において、設定するネットワークは、ベンチマークとして知られている Nguyen-Dupuis Network(1984)¹⁰を用いる。また、BPR 関数のパラメーターは、 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$ とし、分散パラメーターは、 $\theta = 1$ とする。

本数値実験では図 4 左図に示す 13 ノード・19 リンクで構成されるテストネットワークに適用し数値実験を行う。図のノード・リンク上の番号は、それぞれノード番号・リンク番号を示していて、緑色で示されているノードは起点ノード、オレンジ色で示されているノードは終点ノードである。ここで、ノード 5,7,9,11 がゲートノードに該当する。また、図 4 の青色で示されているノードおよびリンクから構成される部分を都市内ネットワーク、それ以外を都市間ネットワークとする。

本研究では、ノード 1,4 を起点、ノード 2,3 を終点とした計 4 組の OD ペアを設定する。また、以降の数値実験において、断り書きがある場合を除き、ネットワークの設定は本節で示すものと同様とする。

図 4 右図は仮想ネットワークを示す。実ネットワークにおけるゲートノード OD ペア間の移動は、青線で示す仮想リンクとして表現される。

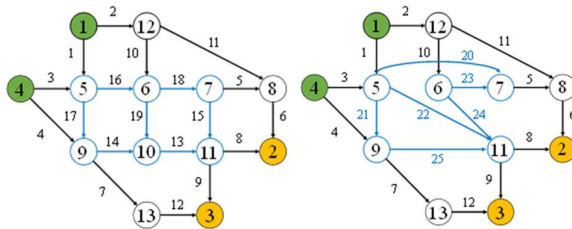


図 4 テストネットワーク

表 1 は OD データを示す。各 OD ペアの交通需要はそれぞれ 400,800,600,200[veh/h]である。

表 1 OD データ

OD	起点	終点	交通需要
1	1	2	400
2	1	3	800
3	4	2	600
4	4	3	200

3.1 基準ケースにおける均衡解

本節では、本数値実験において設定したネットワーク構造および需要条件の下で得られた均衡解の計算結果を示す。以下、この設定条件の下で得られた均衡解を、本研究における基準ケース（施策なし）とする。ここで、リンク混雑率については、以下の数式を用いることで算出した。

$$\text{リンク混雑率} = \frac{x_a}{c_a}$$

また、混雑リンク数とは、リンク混雑率が 1 以上のリンク数の総和である。

表 2 OD ペア 1→2 の経路コストと経路交通量

経路番号	経路交通量 [veh/h]	経路コスト
1	0.0	33.7
2	0.0	39.1
3	91.2	38.8
4	0.0	44.2
5	308.8	35.7

表 2 より、コストの最も大きい経路は使われていない一方で、コストの最も小さい経路も使われていないことがわかる。これは、本モデルでは、ネットワーク全体で総旅行時間を最小化するような配分を行っているため、利用者均衡配分とは異なり、必ずしもコストの最も低い経路が利用されるわけではないことを表している。しかし、アクティブな経路に着目すると、アクティブな経路 2 本の中で、コストの低い経路に交通量が集中していることがわかる。

表 3 混雑リンク数

ケース	混雑リンク数[本]	
	自動運転エリア	手動運転エリア
基準ケース	4	3

表 3 より、自動運転エリアでは、総旅行時間の最小化（システムの最適化）を目的として交通量配分が行われているが、渋滞が発生していることがわかる。

3.2 手動運転エリアの規模を変化させたパターン

3.2.1 実験設定

本節では、手動運転エリアを拡大させたときの総旅行時間の変化を確認する。具体的には、以下

に示す 2 つのパターン「手動運転エリア縮小」「手動運転エリア無し」を想定する。ここで、本実験において手動運転エリアは確率的利用者均衡が満たされるエリアとする。また、手動運転エリアは、図 4 中青で示されたノードとリンクを有するエリアとする。

手動運転エリアを縮小させたケースにおいては、図 5 左側に示す実ネットワークと、図 5 右側に示す仮想ネットワークを想定する。本ケースにおいては、ノード 6,7,10,11 がゲートノードに該当する。

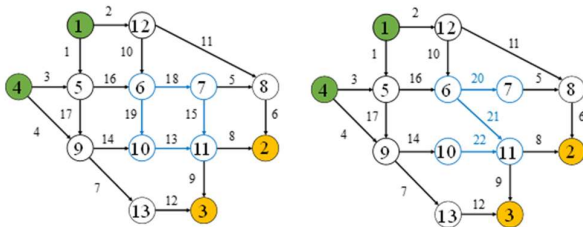


図 5 手動運転エリアを縮小させたケース

手動運転エリアがないケースにおいて、手動運転エリアが存在しないため、想定するネットワークは図 6 に示す実ネットワークのみである。また、この場合、利用者はシステム最適化配分に基づいた経路選択を行う。つまり、このケースでは、利用者は常に完全自動運転を利用している状況を表していると言える。

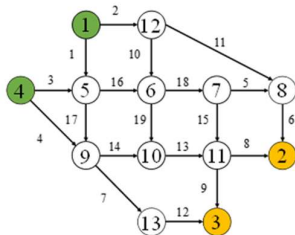


図 6 手動運転エリアがないケース

3.2.2 結果の比較

表 4 総旅行時間比較

ケース	基準ケース	手動運転エリア縮小	手動運転エリアなし
総旅行時間 [min]	78237.3	78199.7	78006.8

表 4 より、手動運転エリアの縮小に伴って総旅行時間が減少していることがわかる。つまり、利

己的な経路選択の減少が、システムの効率化に寄与していると示唆される。

表 5 混雑リンク数比較

ケース	基準ケース	手動運転エリア縮小	手動運転エリアなし
混雑リンク数 [本]	7	7	6

表 5 より、手動運転エリアの縮小、つまり、経路誘導を行う範囲が拡大しても、混雑リンク数に大きな違いがみられないことがわかる。したがって、手動運転エリアの縮小は、混雑緩和に大きく寄与しない可能性が示唆される。

以上を踏まえ、手動運転エリアの縮小は、総旅行時間や混雑リンク数の改善に大きく寄与しない可能性が示唆される。

3.3 交通容量引き上げ

本節では、自動運転普及過渡期における適切な交通施策について検討することを目的とする。また、本数値実験では、施策として以下の 4 つのシナリオを仮定する。

3.3.1 実験設定

施策 1. 基準ケースの配分結果より、混雑率 1 以上の都市間ネットワーク内のリンクに対して交通容量引き上げを行う

施策 2. 基準ケースの配分結果より、混雑率 1 以上の都市内ネットワーク内のリンクに対して交通容量引き上げを行う

施策 3. 基準ケースの配分結果より、混雑率 1 以上の都市間ネットワークおよび都市内ネットワークのリンクに対して交通容量の引き上げを行う

施策 4. 施策 1 と施策 2 を組み合わせることによる相乗効果の確認

交通量の引き上げの際、公平な比較になるよう、施策 1,2,3 については、引き上げる交通容量の総和が等しくなるように設定した。具体的には、引き上げる交通容量の総和が 300[veh/h], 600[veh/h], 900[veh/h], 1200[veh/h], 1600[veh/h], 1800[veh/h] の 6 つのパターンについて数値実験を行った。さらに、リンク 1 本あたりの交通容量引き上げは、交通容量の総和をリンク数で除した値を本実験では使用した。また、引き上げる交通容量は、引き上げる交通容量 = c' [veh/h] とする。施策 3 については、相乗効果を測るために、引き上げる交通容量は施

策1で引き上げた交通容量の総和と施策2で引き上げた交通容量の総和の和とした。ここで、平均混雑率は、各エリアに属するリンクの混雑率（リンク交通量を交通容量で除した値）の単純平均として定義する。また、紙面の都合上容量引き上げ前と容量引き上げが最大の場合の容量引き上げ後のみを結果として表に示す。

3.3.2 結果

本節では、施策1,2,3,4の実験結果を示す。表6は施策1,2,3の総旅行時間の比較、表7は施策4の総旅行時間の結果である。また、表8は施策1,2,3,4のエリア別の総旅行時間を示したものであり、表9は施策1,2,3,4の平均混雑率を示したものである。ここで、 Δt とは交通容量引き上げ前の総旅行時間と交通容量引き上げが最大の場合の総旅行時間の差である。

表6 総旅行時間比較-1

引き上げる交通容量の総和 [veh/h]	総旅行時間 [min]		
	施策1	施策2	施策3
$C=0$	78237	78237	78237
$C=1800$	74193	75177	72361
Δt	4044	3061	5876

表7 総旅行時間比較-2

引き上げる交通容量の総和 [veh/h]	総旅行時間 [min]
	施策4
$C=0$	78237
$C=3600$	71532
Δt	6705
施策1と2の和	7105

表8 エリア別総旅行時間比較

	Δt	
	自動運転 エリア	手動運転 エリア
施策1	2964	1080
施策2	829	2232
施策3	3756	2120
施策4	5448	1257
施策1+2	3792	3312

表6より、施策1,2を比較すると、施策1と施策2の Δt はそれぞれ4044[min], 3061[min]である。

つまり、施策1の総旅行時間の改善が大きいことがわかる。これは、施策1の混雑リンク数が4本、施策2の混雑リンク数が3本と、施策1の混雑リンク数が多いため、施策1の総旅行時間の改善が施策2を上回った要因として、BPR関数の特性が影響している可能性が示唆される。

次に、施策1~3の総旅行時間改善に着目すると、施策3が5876[min]と最も改善していることがわかる。これは、施策3の混雑リンクが7本であるため、施策1と同様にBPR関数の特性が影響している可能性が考えられる。しかし、表8に着目すると、自動運転エリアにおける総旅行時間の改善は施策3の方が大きいことから、自動運転エリアと手動運転エリアを同時に改善したことにより、選択される経路や経路交通量が変化したことにより、よりコストの低い経路が選択されるようになった可能性があることを示唆している。

表7より、施策4の Δt は、施策1と2の Δt の単純和と比較して小さいことがわかる。しかし、表8より、自動運転エリアに着目すると、施策1と施策2の Δt の単純和(3792[min])よりも、施策4の Δt (5448[min])の改善の方が大きい一方で、手動運転エリアにおける施策4の Δt (1257[min])は、施策1と施策2の Δt の単純和(3312[min])よりも小さいことがわかる。したがって、エリア別にみると局所的に相乗効果が生じている可能性が示唆される。

表9 エリア別平均混雑率

	平均混雑率	
	自動運転 エリア	手動運転 エリア
施策なし	0.92	0.85
施策1	0.76	0.82
施策2	0.92	0.53
施策3	0.77	0.64
施策4	0.73	0.56

続いて、平均混雑率に着目すると、表9より、施策1では、自動運転エリアと手動運転エリアの双方に改善がみられた。一方で、施策2では、手動運転エリアのみの改善に留まった。しかし、平均混雑率の改善度合いに着目すると、施策1が0.19改善したのに対して、施策2は0.29の改善であった。これは、手動運転エリアにおける、混雑リンクの割合が、自動運転エリアにおける、混雑リンクの割合よりも大きいため、交通容量引き上げによる、平均混雑率の改善が大きい可能性が示唆される。また、施策4に着目すると、自動運転エリアにおいては、平均混雑率が0.73であること

から、施策1の0.76よりも改善されていることがわかる。したがって、局所的に相乗効果がみられることが示唆される。

4. 結論

本研究では、自動運転普及過渡期を想定し、エリア別に異なる経路選択基準を考慮した交通量配分モデルを構築した。具体的には、低規格道路では確率的利用者均衡を仮定し、ネットワーク全体では総旅行時間の最小化を目的とする構造とした。これらを同時に扱うため、低規格道路の確率的利用者均衡条件を制約として組み込み、ネットワーク全体の総旅行時間最小化問題をMPECとして定式化した。

数値実験の結果、システム最適化配分を行った場合でも、自動運転エリアにおいて混雑が完全に解消されるわけではないことが確認された。また、手動運転エリアを縮小しても総旅行時間および混雑リンク数の改善は限定的であった。交通容量引き上げ施策については、自動運転エリアへの投資が総旅行時間の改善により寄与することが確認された。一方で、混雑率の観点では、手動運転エリアへの投資の方が効果的であることが示された。また相乗効果については、ネットワーク全体では明確に確認されなかったが、自動運転エリアに着目すると局所的な相乗効果が確認された。

以上より、自動運転普及過渡期における道路施策は、指標によって適切な施策が異なる可能性が示唆された。また、当該フェーズにおける道路施策の評価については、ネットワーク全体の指標のみならず、エリア別の指標を併せて検討することが重要であることが示唆された。

5. 今後の課題

本研究ではテストネットワークを用いてモデルの挙動を確認したが、実都市ネットワークへの適用可能性の検証や、大規模ネットワークへの拡張時における計算効率および解の安定性の評価については、十分な検討には至っていない。これらは今後の課題である。

参考文献

- 1) 株式会社マキシマイズ シニアパートナー 渡邊哲, 「自動運転タクシー「Waymo」の衝撃: サンプルシスコでは既にロボタクシーが日常の存在に」, <https://maximize.co.jp/2863/innovation/> (参照 令和8年1月30日)
- 2) JETRO, 「広州市初の全自動運転路線バスが運行開始」, <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/01/f2347257ff866c93.htm> (参照 令和8年1月30日)

- 3) 国土交通省 自動車局 自動運転戦略室長 多田善隆, 「自動運転の実現に向けて取り組みについて」, 令和5年5月9日 <https://www.mlit.go.jp/koku/content/001609155.pdf> (参照 令和7年11月2日)
- 4) Talebpour, H.S. Mahmassani, and A. Elfar, Investigating the Effects of Reserved Lanes for Autonomous Vehicles on Congestion and Travel Time Reliability, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* · January 2017
- 5) Morandi, V., Bridging the user equilibrium and the system optimum in static traffic assignment: a review」, *4OR (A Quarterly Journal of Operations Research)* Vol.22, No.1, pp.89-119, 2024.
- 6) Jian Wang, Srinivas Peeta d, Xiaozheng He, Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles, *Transportation Research Part B* 126 (2019) 139-168
- 7) Keya Roy, Nam Hong Hoang, Hai L. Vu, 2022, Modeling Autonomous Vehicles deployment in a multilane AV zone with mixed traffic *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, VOL. 23, NO. 12
- 8) Zhibin Chen, Fang He, Yafeng Yin, Yuchuan Du, Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks, *Transportation Research Part B* 99 (2017) 44-61
- 9) 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 土木学会 土木計画学研究会「交通ネットワーク」出版小委員会, 1998
- 10) Nguyen, S., & Dupuis, C. (1984). An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs. *Transportation Science*, 18(2), 185-202.