

連続的な自動運転車専用レーン整備モデルの構築と整備効果の詳細検証

安藤 宏恵¹・森 俊勝²・杉浦 聡志³・溝上 章志⁴

¹正会員 熊本大学助教 くまもと水循環・減災研究教育センター（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39-1）

E-mail: hiroeando@kumamoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 合同会社ゴダイベスト（〒861-5537 熊本県熊本市北区万楽寺町 587）

E-mail: toshikatsu.mori@godaibest.jp

³正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院（〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 熊本学園大学教授 経済学部（〒862-8680 熊本県熊本市中央区大江 2-5-1）

E-mail: sh-mizokami@kumagaku.ac.jp

本研究では自動運転車と普通車が混在する状況のもと、自動運転車の導入効果を高めるための最適な専用レーン整備計画を考える。より効果的かつ現実的な施策とするため、自動運転車専用レーンの連続性を担保したうえでリンク容量制約付き総走行距離最小化を実現する最適専用レーンの配置デザイン問題を構築した。熊本都市圏の実道路ネットワークにおいて検証し、自動運転車普及率が増加するにつれて専用レーン設置の効果が向上すること、専用レーンを設置する候補として大規模道路のみに限定すると効果が小さくなることなどを確認した。さらに、得られた最適な専用レーンの配置デザインを導入した条件のもと交通流シミュレーションを実施し、自動運転車と普通車による効果の違いなど、専用レーン設置による交通状況の変化を分析した。

Key Words: *autonomous vehicle, autonomous vehicle lane, traffic simulation, optimization*

1. はじめに

近年の自動運転技術の発展により、数年以内に自動運転車両 (AVs) による移動が一般化されることが予想される。AVs の普及は、移動時間に対する時間価値の変化や駐車場需要の低下、ライドシェアシステムの実現、過疎地域の公共交通サービスの向上など既存の交通状況、さらには日常生活の行動を大きく変える可能性が高い。そのため、システム整備の観点においても、AVs に合わせた管制システムの構築やインフラ設備が急務である。

AVs の導入による交通輸送への大きな貢献は、混雑の解消と安全性の向上であるといわれており^{1,2)}、輸送の効率性は大きく高まることが期待される。しかしながら、道路ネットワーク上の全ての車両が AVs に置き換わるまでには障壁が多いことが指摘されている¹⁾。AVs の普及率はいくつかの段階をもって増加するため、普及途上ではこれまでの手動運転車 (HV) と AVs が混在する。混在状態における交通容量を分析した研究は多く蓄積され

ており^{例えば3,4)}、それらの多くにおいて全車両が AVs であれば大きな容量増大が期待できるが、混在交通では必ずしもそうでないことが指摘されている。混在交通下では道路の運用をコントロールすることでパフォーマンスを向上させることが期待できる。Carone et al.³⁾ は混在レーンにおける交通流シミュレーションの結果から、容量を効果的に増大させるには AVs 専用レーンの設置が望ましいことを示した。類似の結果は Ghiasi et al.⁵⁾ においても示されている。混在交通下において交通容量を解析的に導出する手法を提案しており、数値シミュレーションにより AVs 専用レーン運用がスループット増大効果につながることを示した。AVs 専用レーンの配置デザイン問題に関する研究は多く実施されている。Chen et al.⁶⁾ は AVs と HVs いずれも利用者均衡に従った経路選択行動のもと AVs 専用レーンのデザイン問題を構築した。さらに Tani et al.⁷⁾ では不確実性を考慮したフローパターンに対する AVs 専用レーンのデザイン問題を提案している。Liu and Song⁸⁾ は HVs のみに課金するレーンを設け AVs と HVs の

分離を誘導することによりシステム性能を効率化する方法を示した。これに加えて、HVs のみに課金するレーンの料金最適化問題が Wang et al.⁹⁾によって構築されている。

Ghiasi et al.⁹⁾が指摘するように、車線変更は AVs によるネットワーク効率化に大きな影響を及ぼす。交差点をまたいだリンクにおいて AVs 専用レーンが不連続であれば、車線変更を余儀なくされ、ネットワークのパフォーマンスが低下することが予想される。またレーン整備の実用性の観点からも不連続な AVs 専用レーンがいたるところに出現することを避け、一定の連続性を有する AVs 専用レーンの配置計画が必要である。そのため、本研究では、AVs 専用レーンの配置に関する最適化問題においてレーン配置が必ず木構造となる制約を与えることで連続性を保証する。さらに、道路の新設や増強は行わない効果的な運用方法を明示するため、既存の交通容量を AVs 専用レーンと混在レーンに割り当てる問題とした。リンク容量制約に基づく総走行距離最小化となる AVs 専用レーンの配置を求めるデザイン問題であり、AVs 専用レーンの導入が及ぼす HVs への影響を同時に考慮する。また、実都市のネットワークにおいて配置デザイン問題によって得られた最適な AVs 専用レーンを設置した条件のもと、交通シミュレーションモデルを用いて詳細な交通状況を検証する。

2. 最適 AVs 専用レーンデザインモデル

本モデルの前提条件を述べる。AVs と HVs それぞれの需要 OD データは既知であり、デザイン路線の本数は政策変数としてあらかじめ与えられる。デザイン路線とは、AVs 専用レーンが設置されるリンクが連続して構成されるものであり、連続リンク数の下限値が制約条件として設定される。AVs 専用レーンが設置されたリンクのうち、専用レーンは AVs のみが利用可能であり、残りの通常レーンは AVs と HVs の両車種が利用可能である。AVs 専用レーンが設置されないリンクは全てのレーンを両車種が利用する。既存レーン数のうち何レーンを専用とするのかは、パラメータによってリンクごとに設定する。本パラメータを調節することにより、既存の全車線を専用レーン化の対象として AVs のみ通行可能なリンクとすることも可能である。

リンク容量制約のもと総走行距離を最小化する AVs 専用レーンの配置を求める最適 AVs 専用レーンデザインモデルを以下のように構築する。

$$\min_{y, x^A, x^H, \theta, \mu} \sum_{e \in E} \sum_{o \in O} \gamma_e x_{oe}^H + \sum_{e \in E} \sum_{o \in O} \gamma_e x_{oe}^A \quad (1)$$

subject to

$$\begin{cases} \sum_{e \in In(n)} x_{oe}^A - \sum_{e \in Out(n)} x_{oe}^A = \\ \begin{cases} -\sum_{d \in D} v_{od}^A & \text{if } n = o \\ v_{od}^A & \text{if } n \in D \quad \forall n \in N, o \in O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{e \in In(n)} x_{oe}^H - \sum_{e \in Out(n)} x_{oe}^H = \\ \begin{cases} -\sum_{d \in D} v_{od}^H & \text{if } n = o \\ v_{od}^H & \text{if } n \in D \quad \forall n \in N, o \in O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{oe}^H, x_{oe}^A \geq 0 \quad \forall e \in E, o \in O \quad (4)$$

ただし、

- E : フローネットワークのリンク集合. その要素は $e \in E$
- N : ノードの集合
- O : 出発地ノードの集合. ただし, $o \in O \subseteq N$
- D : 到着地ノードの集合. ただし, $d \in D \subseteq N$
- x_{oe}^A : o を起点とする AVs のリンク e における交通量
- x_{oe}^H : o を起点とする HVs のリンク e における交通量
- γ_e : リンク e の長さ
- v_{od}^A : ノードペア (o, d) の AVs における OD 交通量. $o \in O, d \in D$
- v_{od}^H : ノードペア (o, d) の HVs における OD 交通量. $o \in O, d \in D$
- $In(n)$: ノード n に流入するリンクの集合
- $Out(n)$: ノード n から流出するリンクの集合

である。式(1)は AVs と HVs の総走行距離の和で定義される目的関数である。この目的関数は AVs と HVs の交通量 x_{oe}^A, x_{oe}^H 、AV 専用レーン設置の二値変数 y のサブツァー回避のための制約に用いる θ, μ を決定変数とする。サブツァー回避の制約については後述する。式(2), (3) はそれぞれ AVs と HVs の出発地別フロー保存制約である。式(4)は交通量の非負条件である。

AVs 専用レーンはデザインネットワーク上の経路として特定される。提案するモデルでは複数のデザイン路線（経路）を同時に構成することで、ネットワーク上の任意の連続したリンクに AVs 専用レーンを配置することを可能とする。デザインネットワークは図-1 に示されるように、仮想の出発点である Source および仮想の到着点である Sink と道路ネットワーク上のノードを接続するリンク、通常の道路ネットワークに含まれるリンクで構成される。通常のフローネットワーク E は図-1 中の太線で示されるリンクで構成され、 x_{oe}^A, x_{oe}^H はフローネットワーク上のみを、 y はデザインネットワーク上を流れる。

デザインネットワークにおいて、AVs 専用レーンの二値デザイン変数 y は以下の式(5)に示すデザインフロー保存則の制約を満たす。また、一定の距離以上の AVs 専用レーンとなるよう設置されるリンク本数の下限値制約を式(6)とする。下限値 λ は任意の値を設定することができ、

0 とすることも可能である。

$$\sum_{b \in In(n)} y_{kb} - \sum_{b \in Out(n)} y_{kb} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = s \\ 1 & \text{if } n = t \quad \forall n \in N, k \in K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{b \in B} y_{kb} \geq \lambda \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_{kb} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, k \in K \quad (7)$$

ただし、

B : デザインネットワークリンク集合。その要素は $b \in B$ 。ただし、 $b(e)$ と示すときには、フローネットワークのリンク $e = (i, j)$ と同一のノードペアを接続するデザインリンクを指すものとする。

K : AVs 専用レーンの路線集合

y_{kb} : 専用レーン路線 k , リンク b のデザイン変数

λ : AVs 専用レーンの持続距離下限値

s : デザインネットワークの仮想出発地ノード

t : デザインネットワークの仮想目的地ノード

式(5)のデザインフロー保存則の制約のみでは、最適解においてサブツアーが含まれることがある。例えば、図-2 においてリンク集合 $\{\{U_{b \in B} y_{kb} | y_{kb} = 1\} = \{(s, 3), (3, 4), (4, t), (1, 2), (2, 1)\}$ が最適解となる場合、リンク $(1, 2), (2, 1)$ は (s, t) を経由していないが式(5)を満たしており、これがサブツアーである。そのため Colombo¹⁰⁾で採用されているデザインネットワークに補助フローを導入した制約を加えることでサブツアーを除去する。補助フローは任意の起点から到達するノード数 $(\sum_{n \in N-s} \theta_{kn})$ と等しい重みのフローを流下させ、ノードを1つ経由するごとに1ずつ重みが減少する。図-2ではAVs専用レーンを持つリンクを太線で示し、リンクに与えられた数字は補助フロー μ を示す。 s からは重み3の補助フローが流出し、ノードを経由するごとに1ずつ小さな重みが与えられる。経由するノード $\{3, 4\}$ に該当する到達ノード二値変数 θ_{kn} は 1 となる。これにより、起終点間におけるAVs専用レーンのデザイン路線は通過する到達ノードと補助フローの制約により必ず木構造となる。木構造を保証することによりサブツアーの構成は不可能となる。以上の条件は式(8)から(14)の通りに定式化される。

$$\mu_{kb} \leq |N| \mu_{kb}, \quad \forall b \in B, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{b \in In(n)} \mu_{kb} - \theta_{kn} = 0, \quad \forall n \in N - s \quad (9)$$

$$\sum_{b \in Out(s)} \mu_{kb} - \sum_{n \in N-s} \theta_{kn} = 0 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{b \in In(n)} \mu_{kb} - \sum_{b \in Out(n)} \mu_{kb} = \theta_{kn}, \quad \forall n \in N - s, k \in K \quad (11)$$

$$\theta_{ks} = 1 \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$\theta_{kn} \in \{0, 1\} \quad \forall n \in N, k \in K \quad (13)$$

$$\mu_{kb} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall k \in K, b \in B \quad (14)$$

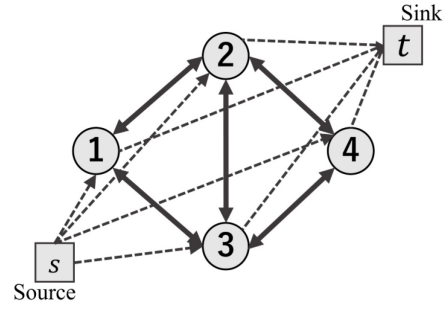


図-1 デザインネットワーク

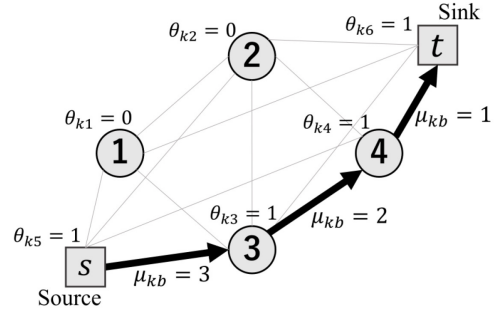


図-2 補助フロー変数 μ_{kb} と到達ノード変数 θ_{kn} 。

ただし、

θ_{kn} : 専用レーン路線 k がノード n を経由するならば 1, そうでなければ 0 をとる到達ノード変数

μ_{kb} : 補助フローを示す変数

式(8)は補助フロー μ_{kb} と y_{kb} の関係を示す。 $y_{kb} = 1$ のときにのみ、補助フローはリンク b を利用できる。式(9)は任意のノードがAVs専用レーンを持つリンクのデザイン路線 k に含まれるとき、 $\theta_{kn} = 1$ となることを制約する。式(10)は各デザイン路線において通過するノード数と Source から流出する補助フロー数が等しいことを示す。式(11)ではノードにおいて補助フローが流入する値と流出する値の差が θ_{kn} と等しいことを示す。式(12)は補助フローが Source を必ず通過することを制約する。

つぎに、各リンクが持つ既存のレーン数から一部をAVs専用レーンとする際の運用変更条件について、式(15)から(17)に示す。

$$\sum_{o \in O} x_{oe}^H + \sum_{o \in O} x_{oe}^A \leq (1 - 1/l_e) \quad (15)$$

$$l_e \sum_{k \in K} y_{kb(e)} c_e + \beta \sum_{k \in K} y_{kb(e)} c_e \quad \forall e \in E \quad (16)$$

$$\sum_{o \in O} x_{oe}^H \leq (1 - 1/l_e \sum_{k \in K} y_{kb(e)}) c_e \quad \forall e \in E \quad (17)$$

ただし、

l_e : リンク e の車線数

c_e : リンク e の交通容量

β : AVs 専用指定による専用レーン容量増大パラメータ

式(15)は混在レーンにおける交通容量制約を示す。混在レーンはAVs専用レーンを持つリンクのデザイン路線に含まれた数を $p = \sum_{k \in K} y_{kb(e)}$ としたとき、容量が

$(1 + (\beta - 1/l_e)p)c_e$ となる。これは AVs 専用レーンの設置によりスループットがリンク全体で向上することを表現し、 $\beta - 1/l_e > 0$ であるときにリンク容量が増大する。ただし、混在レーンの容量はAVs専用レーンの設置により減少するため、式(16)により HVs の交通量の上限が $(1 - p/l_e)c_e$ となることを表現する。式(15), (16)により、AVs 専用レーンは βpc_e の容量をもち、AVs のみが通過できることが示される。式(17)は任意のリンクにおいて設置されるAVs専用レーン数が既存のレーン数以下となることを制約する。

以上の式(1)から(17)までにより、リンク容量制約付き総走行距離を最小化する連続的なAVs専用レーンの配置を求める問題として定式化された。

3. テストネットワークによるモデル挙動の検証

提案したモデルの挙動を検証するため、図-3 に示す Nguyen-Dupuin ネットワーク¹¹⁾によって試算をおこなう。

OD データは表-1 に示し、AVs は 35 台、HVs は 20 台の合計 55 台が総需要である。出発地はノード 1,4、目的地はノード 2,3,8 とする。また、リンク容量は一律とし、リンク長は図-3 に準拠する。表-2 に 5 つの試算ケースのパラメータ設定をそれぞれ示す。図-3、図-4 より専用レーン設置による AVs の容量増加率パラメータを変更した Case1 と Case2 の比較を行う。専用レーン設置により AVs の容量が 2 倍になる Case1 に対し、Case2 では AVs の容量は 1.5 倍にとどまる。それぞれの交通量を比較すると、Case1 では専用レーンを持つデザイン路線に AVs の交通量が集中しているが、Case2 ではデザイン路線内のリンクを使用する AVs が減少し、他のリンクが使用されている。それに伴い、HVs の交通量も変化していることが確認できる。各ケースにおける目的関数の変化を図-5 に示す。AVs の容量増加率が大きい Case1 の方が目的関数の値は小さくなっており、増加率パラメータ設定が総走行距離に影響を与えていることがわかる。Case2 と Case3 の比較では、AVs の容量増加率は固定とし AVs 専用レーンとなるレーン数を 1/3 から 1/2 に増加している。専用レーン設置によって HVs の容量がより大きく削減されることを意味するが、本ネットワーク条件においては HVs の容量減少が増加することにより総走行距離は増加する傾向となった。専用レーン設置により通行不可能となった HVs が迂回したことの影響が表現できている。

次に、AVs専用レーン化するレーンの割合とAVs容量増加率 β のパラメータ設定を変更せず、デザイン路線数を1本ずつ増加させた場合をCase3,4,5とする。路線数を2本としたCase4と3本としたCase5の目的関数に変化していないことがわかる。このことから、本条件においては専

表-1 Nguyen-Dupuin ネットワークにおける OD 設定

	D				
	AVs		HVs		
	2	3	2	3	8
O	1	0	25	4	3
	4	10	0	5	5
					0

表-2 補助フロー変数 μ_{kb} と到達ノード変数 θ_{kn}

Case	1	2	3	4	5
AVs専用レーン化するレーンの割合	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
自動運転車容量増加率 β	2	1.5	1.5	1.5	1.5
デザイン路線本数 k	1	1	1	2	3

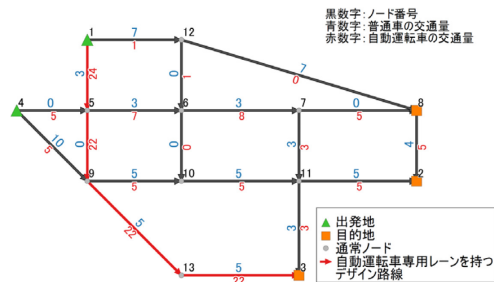


図-3 Case1 のデザイン路線と交通量

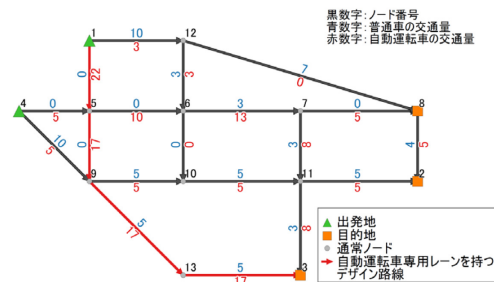


図-4 Case2 のデザイン路線と交通量

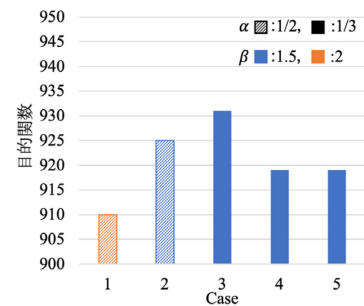


図-5 各 Case 試算時の目的関数の値

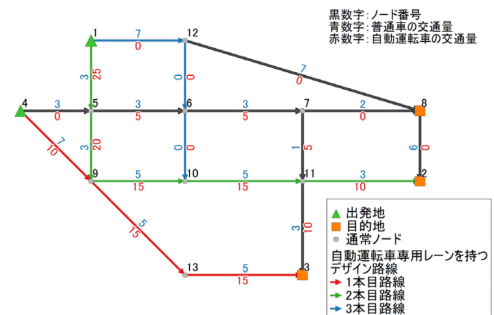


図-6 Case5 のデザイン路線と交通量

用レーンを持つデザイン路線は2本で十分であり、3本以上の設置は効果がないといえる。図-6は路線数を3本としたCase5のときの結果であり、1,2,3本目のデザイン路線を図中リンクの赤、緑、青で示す。そのため、赤、緑で示すリンクに専用レーンを設置することが、最も効果的といえる。リンク上に示すAVsとHVsの交通量に着目すると、Case5の場合にはAVs35台のうち25台が専用レーンを持つリンクのみを走行して目的地まで到着している。

テストネットワークを用いたモデルの挙動確認では、AVs専用レーン化するレーンの割合とAVs容量増加率のパラメータ設定が総走行距離最小化に影響を及ぼすこと、デザイン路線本数の変化によって専用レーン設置の効果の限界を把握可能であることがわかった。これにより、専用レーン設置によるAVsの利点とHVsの欠点の相互関係を考慮に入れたモデルとなっていることが確認できた。

4. 熊本都市圏道路ネットワークへの適用

テストネットワークにおける試算によって挙動が確認された提案モデルについて、実都市の道路ネットワークへの適用と分析をおこなう。

(1) 使用するデータとシナリオ設定

実道路ネットワーク適用の対象地域は熊本都市圏とする。道路ネットワークは熊本市内の主要道路以上の道路とし、ODデータは熊本都市圏PT調査エリアのデータに基づいた日単位ODとする。図-7にPT調査エリアと使用する道路ネットワークを示す。熊本市外のODについては、近隣のセントロイドに集約することで道路ネットワーク上に反映している。リンク数は858(双方向)、ノード数は291、セントロイド数は68、ODペア数は4,361となっており、各リンクは0.5(両方向合わせて1)、1,2,3のレーン数を持つ。AVsレーンを設置する対象リンクとなる車線数、AVs普及率、AVs容量増加率を変更したシナリオについて試算をおこなった。AVs普及率はODに依らず均一とする。

(2) AVs普及率や専用レーン設置対象リンクの影響

AVs専用レーンを設置する対象リンクの属性を片側2車線道路以上とし、AVs普及率を変更させたときのデザイン路線数 k ごとの目的関数を図-8に示す。AVs容量増加率は1.5と固定し、全てのリンクにおいて設置されるAVs専用レーンは既存車線数のうち1車線とする。斜線つき棒グラフが各条件において最適解が最小となるデザイン路線を示す。25%、50%、75%の普及率においてそれぞれ $k=2,3,2$ となった。この値以上のデザイン路線の導入は各条件において過剰となる。これ以降の各シナ

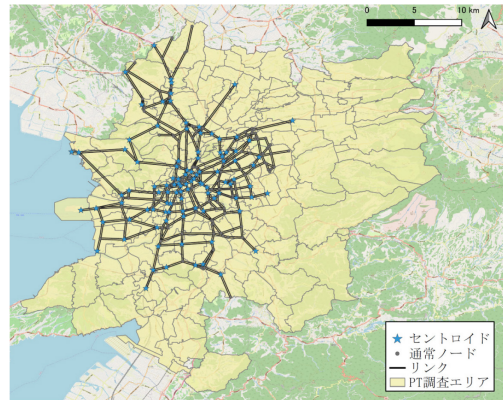


図-7 対象地域と道路ネットワーク

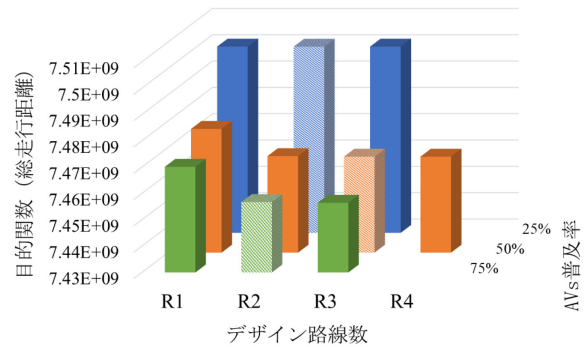


図-8 デザイン路線数ごとの目的関数

表-3 現況と比較した目的関数の変化率

対象リンク	AVs 25%	AVs 50%	AVs 75%
2車線以上	0.0000%	-0.4567%	-0.5939%
3車線以上	0.0094%	-0.0071%	-0.0071%
1車線のみ	0.0000%	0.0000%	0.0000%

リオにおける最適AVs専用レーンデザインの結果は、最小最適解をとるデザイン路線数に基づく結果を用いて考察する。また、AVs普及率が増加するにつれて目的関数である総走行距離は減少していることがわかる。

表-3に対象リンク別のAVs普及率による総走行距離の現況に対する変化率を示す。現況とはAVs専用レーンが全く設置されていない状況を指す。片側2車線以上の道路を対象とした施策が最も高く、AVs普及率が高くなるほど総走行距離も減少する。片側3車線以上の道路を対象とした場合も同様に、普及率向上による総走行距離は減少するがその効果は小さい。大規模道路だけに限った施策よりも片側2車線以上の道路を対象に含めた場合の方がAVs専用レーン設置の効果が高いことがわかった。特にAVs普及率が25%の場合は、片側3車線以上の道路に限定した際にはAVs専用レーンなしの現況と比べて目的関数が増加しており、専用レーンは設置しない方が効率的であるという結果となった。普及率や施策対象によ

ってはAVs専用レーンの設置がネットワーク全体にとって悪影響となる可能性を示している。片側1車線のみ限定する場合、AVs専用レーンが設置されるリンクはHVが利用不可能となり、完全にAVs専用リンクとなる。しかしながら、片側1車線のリンクのみを対象にする施策ではいずれのAVs普及率においても総走行距離の改善はみられなかった。AVs専用レーン設置リンクを利用不可能となり迂回する必要があるHVの走行距離が増加する影響があったと考えらえる。

ここまで1.5に固定してきたAVs容量増加率パラメータを2.0に変化した場合の結果を検証する。AVs普及率は75%に固定、対象リンクは片側2車線以上とした。AVs容量増加率が1.5から2.0に増加することで、総走行距離は微小に減少した。AVsとHVの内訳を確認すると、AVsの総走行距離は容量増加率が上がることによって増加し、その増加分以上にHVの総走行距離が減少していた。AVs容量増加率が上がることにより必ずしもAVsに好影響があるわけではなく、専用レーンを走行するAVsが増加することでHVが走行可能な容量に余裕が生じ、HVの総走行距離の方が減少するケースが生じることがわかった。

(3) 最適なAVs専用レーンのデザイン

(2)において示した結果に基づき、最も効果的であった片側2車線以上の道路を対象に各AVs普及率における最適なAVs専用レーンデザインの空間的配置を図-8,9,10に示す。既存の車線数と道路ネットワーク周辺の状況を図-7に示す。

普及率25%の場合は、両方向にAVs専用レーンが設置されるリンクはない。中心市街地とその周辺の道路に設置されており、バイパス道路を長距離にわたって専用レーン化する区間はなかった。普及率が50%または75%まで増加すると中心市街地、住宅街から熊本ICまで接続する国道57号線、北方向へ延びる国道3号線において比較的長くAVs専用レーンが設置されている。特に普及率50%では両方向にAVs専用レーンが設置されているリンクが多くみられる。普及率50%と75%では、国道57号線、国道3号線、市電が走る電車通り、JR線と並走する白山通りが共通してAVs専用レーンが設置されている主な道路であった。一方、普及率25%と50%で共通していた中心市街地内の市役所や熊本城に面する電車通り部分のAVs専用レーン設置は普及率75%では実施されておらず、普及率によって最適な専用レーンデザインの空間的分布が異なることがわかった。

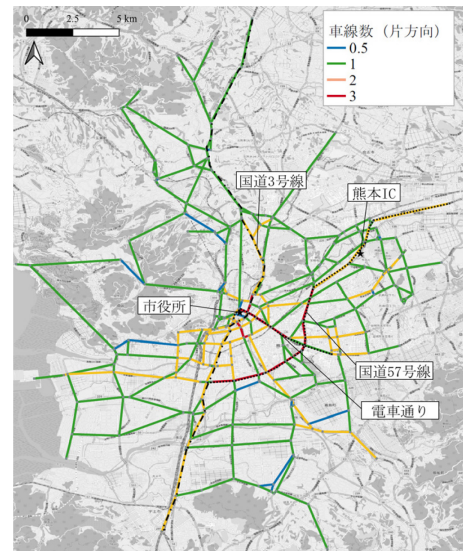


図-7 対象地域と道路ネットワーク

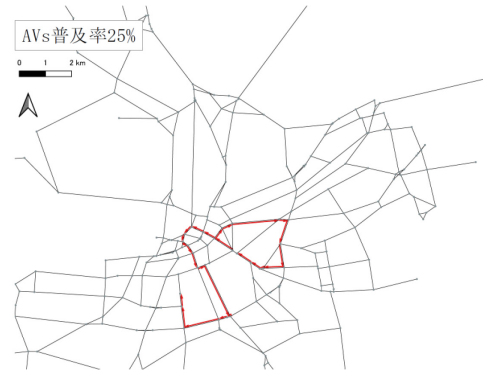


図-8 AVs専用レーン設置リンク (AVs25%)

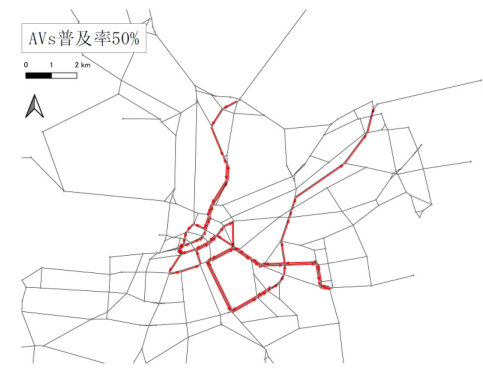


図-9 AVs専用レーン設置リンク (AVs50%)

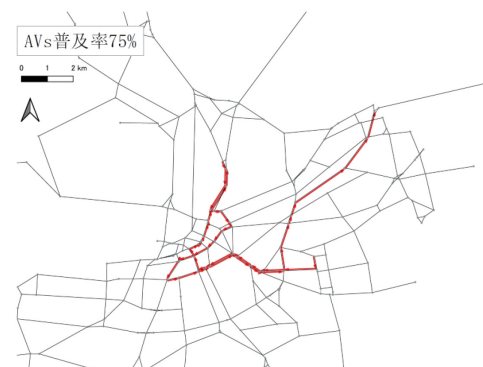


図-10 AVs専用レーン設置リンク (AVs75%)

5. シミュレーションモデルによる交通状況分析

前節で示したように、AVs 専用レーンを設置した際の HVs が受ける影響を加味し、全利用者を考慮に含めた施策とするため、AVs と HVs の総走行距離最小化を実現する AVs 専用レーンの配置デザインを数理問題により求めた。本章では、得られた最適 AVs 専用レーン配置の条件のもと交通流シミュレーションを実施し、AVs 専用レーン設置時の交通状況进行分析する。

(1) 交通流シミュレーション

K-MATSim (Kumamoto Multi-Agent Traffic Simulator) は熊本大学で独自に開発したエージェントベースのメソ交通流シミュレータである。入力された道路ネットワーク、初期交通需要などのデータに基づいて対象地域の交通環境を生成し、個々の交通利用者の交通行動とそれによって生じる動的な交通流をシミュレートする。エージェントベースシミュレーションとメソ交通流シミュレーションのループ構造となっており、各交通利用者エージェントは一度走行した道路状況を学習し、次の走行時にはその結果を経路選択時に反映する。そのため、試行ごとに走行経路が異なる場合があるが、学習が進むことで、選択する走行経路が収束する。AVs 専用レーン導入前および導入後の道路状況を評価するため、導入後交通利用者の探索行動（経路選択の変動）が収束するまで交通シミュレーションを繰り返し実行した。その結果、いずれも 20 試行時には経路を変更する交通利用者の割合が 0.5% 程度で収束したため、今回はシナリオ別にそれぞれ 20 試行目の結果を用いることとした。なお、メソ交通流シミュレーション K-MATSim は、交通工学研究会が策定した交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル¹²⁾に基づく標準性能を持つことを検証済みである。

対象エリアは図-7 に示す 2012 年熊本都市圏 PT 調査エリアとし、2016 年製住友電工製全国デジタル道路地図データベース(DRM)のシミュレーション対象エリア内に含まれる主要道路を対象とする。PT 調査結果データの道路上の交通トリップ(二輪車+原付き+自動車)のうち、熊本市中心エリアの内内、外内、内外トリップを対象に、シミュレーション上で発生する道路上を移動する交通トリップは全て AVs または HVs とした。前章で示す最適 AVs 専用レーン配置デザインモデルにおいて効果が少ないとされた片側 1 車線道路のみのシナリオを除き、対象道路は片側 2 車線以上または 3 車線以上、AVs 普及率は 25, 50, 75% のシナリオについてシミュレーションを実施した。

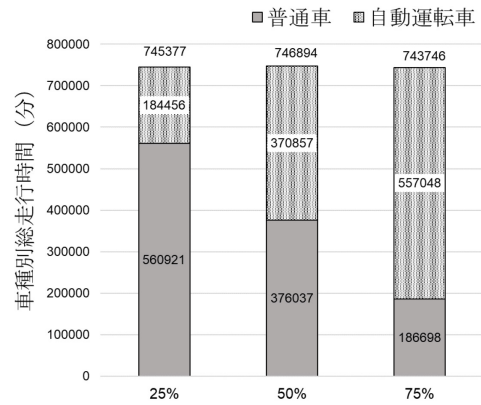


図-11 片側 2 車線以上における車種別総走行時間

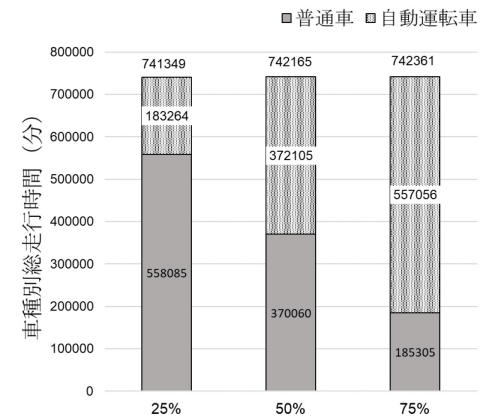


図-12 片側 3 車線以上における車種別総走行時間

(2) 最適 AVs 専用レーン設置時の交通状況

図-11, 12 に片側 2 車線以上、片側 3 車線以上の道路を対象とした場合の AVs と HVs の車種別総走行時間を AVs 普及率ごとに示す。片側 2 車線以上の道路を対象とするとき、AVs 普及率が向上するにつれて、両車種の総走行時間も減少する。しかし、片側 3 車線以上の道路に限定すると、普及率が向上するにつれて総走行時間は増加してしまうことがわかる。シミュレーションに基づく車両の総走行時間の観点においても、片側 3 車線以上の道路に限定することはネットワーク全体において良い影響を及ぼさず、片側 2 車線以上の道路を対象とする場合の方が効果的であった。

車種の内訳に着目すると、片側 2 車線以上を対象とする場合の総走行時間における AVs の走行時間割合は、普及率に応じて 24.7%, 49.7%, 74.9% と微小に AVs の走行時間の方が初期需要の割合より小さい。しかし、微小な差であり走行時間において車種による大きな差はないといえる。また、同じ普及率において片側 2 車線以上または片側 3 車線以上を比較した場合、HVs は片側 3 車線以上において片側 2 車線以上よりも総走行時間が小さくなっている。つまり、片側 3 車線以上を対象とする場合における総走行時間の増加は、AVs の影響が大きいといえ

る。現在のシナリオでは、既存の車線数のうち AVs 専用レーン設置は 1 車線に固定しているため、片側 3 車線以上の道路であっても 2 車線以上を AVs 専用レーンとすることができない。片側 3 車線以上に限定した際の効果が発揮されにくい前提条件となっているとも考えられるため、今後、既存の車線数に応じた AVs 専用レーンの設置レーン数も検討する必要がある。

背景において述べたように、AVs 専用レーンの設置には AVs と HVs のフローの分離をうまく誘導し、交通システム全体としての効率化を促す期待がある。AVs と HVs の初期需要が同等となる普及率 50%において、各リンクで使用される車種がどの程度棲み分けられているかを検証するため、表-4 に各リンク交通量のうち AVs が占める割合を示す。片側 2 車線以上、片側 3 車線以上ともに AVs の割合が 0.4 - 0.6、つまり AVs と HVs のフローがほぼ同程度流れているリンクは 70%近く存在した。反対に、AVs の割合が 0.2 以下、または 0.8 以上と車種による交通量に偏りがあるリンクはそれぞれで 5%程度であった。これらの結果から、全体リンクのうち 10%程度が車種フローに偏りが生じており、使用リンクの棲み分けができていない部分であるといえる。

6. おわりに

本研究では、道路ネットワーク上の各リンクが持つ既存の交通容量を AVs 専用レーンまたは混在レーンに割り当てることにより、AVs と HVs の総走行距離最小化を実現する連続的な AVs 専用レーンの最適デザイン問題を構築した。AVs 専用レーンのデザインフローには木構造を用いることで連続性を担保し、実用性の高いデザイン問題とした。熊本都市圏の実道路ネットワークを用いて構築したモデルを検証し、AVs 専用レーンの配置は AVs 普及率によって特徴が異なること、大規模道路のみを設置対象に限定すると設置効果が小さくなることがわかった。さらに、得られた最適 AVs 専用レーン配置の条件のもと交通流シミュレーションを実施し、車種別の走行時間から AVs 専用レーン設置の効果を検証するとともに、専用レーン導入により 10%程度のリンクにおいて AVs と HVs の交通量に偏りがあることがわかった。

今後の展望を以下に述べる。

- 得られた最適解に基づく交通流シミュレーションによる分析が不十分であるため、個々の車両の速度変化や移動時間短縮効果、迂回状況について詳細に検証し、AVs 専用レーン設置効果を確認する必要がある。
- 既往研究において多く用いられるネットワーク均衡に基づく研究への拡張として、区分線形化を用

表-4 リンク交通量 AVs 率別のリンク数の割合

リンク交通量のうち 自動運転車の割合	片側 2 車線 以上	片側 3 車線 以上
0-0.2	6.2%	4.5%
0.2-0.4	10.3%	10.3%
0.4-0.6	67.4%	68.9%
0.6-0.8	10.4%	11.4%
0.8-1.0	5.3%	5.0%

いた混合整数線形計画問題¹³⁾により、利用者均衡を取り入れたモデルとして定式化することが可能である。

- OD による AVs 専用レーン設置効果の違いや地域の特性に合わせた普及率の偏りなどを考慮し詳細に分析することで、実都市の道路整備状況に応じた施策の検討を行うことが可能である。

謝辞：本研究は国土交通省委託研究「道路政策の質の向上に資する技術研究開発調査」、JSPS 科研費 (21H01446, 22H01610) の助成を受けて遂行された。ここで記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Fagnant, D.J. and Kockelman, K.: Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, *Transportation Research Part A*, 77, 167-181, 2015.
- 2) Ye, L. and Yamamoto, T.: Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow, *Physica A*, 490, pp. 269-277, 2018.
- 3) Carrone, A.P., Rich, J., Vandet, C.A. An, K.: Autonomous vehicles in mixed motorway traffic: capacity utilisation, impact and policy implications. *Transportation*, 48, pp. 2907-2938, 2021.
- 4) Tientrakool, P., Ho, Y. and Maxemchuk, N. F.: Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance, *2011 IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1-5, 2011.
- 5) Ghiasi, A., Hussain, O., Qian, Z. and Li, X.: A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method, *Transportation Research Part B*, 106, pp. 266-292, 2015.
- 6) Chen, Z., He, F., Zhang, L. and Yin, Y.: Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration, *Transp. Res. Part C*, 72, pp. 143-156, 2016.
- 7) Tani, R., Sumalee, A. and Uchida, K.: Travel time reliability-based optimization problem for CAVs dedicated lanes, *Transportmetrica A: Transport Science*, DOI: 10.1080/23249935.2021.1954107, 2021.
- 8) Liu, Z. and Song, Z.: Strategic planning of dedicated autonomous vehicle lanes and autonomous vehicle/toll lanes in transportation networks, *Transportation Research Part C*, 106, pp. 381-403, 2019.
- 9) Wang, J., Lu, L., Peeta, S. and He, Z.: Optimal toll design

- problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles, *Transportation Research Part C*, 125, 102952, 2021.
- 10) Colombo, F.: Mathematical programming algorithm for network optimization problems. Ph.D thesis, University of Milano, 2014.
- 11) Nguyen, S and Dupuis, C.: An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs, *Transportation Science*, 18(2), pp.185-202, 1984.
- 12) (社)交通工学研究会 交通シミュレーション自主研究委員会：交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル (案) , <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/VfyMan.pdf>, 2004.
- 13) Fontaine, P. & Minner, S.: Benders Decomposition for Discrete-Continuous Linear Bilevel Problems with application to traffic network design. *Transportation Research Part B*, 70, pp.163-172, 2014.

(Received September 30, 2022)

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL DESIGN MODEL FOR CONTINUOUS LANES DEDICATED TO AUTONOMOUS VEHICLES AND VERIFICATION OF IMPROVEMENT EFFECTS USING A TRAFFIC SIMULATOR

Hiroe ANDO, Toshikatsu MORI, Satoshi SUGIURA and Shoshi MIZOKAMI