トリップ内で交通情報の精度が変化する道路ネットワークを対象とする交通量配分モデル

峪　龍一[1]・加藤哲平[2]・内田賢悦[3]

[1]正会員　北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

[2]正会員　長岡技術科学大学大学院工学研究科（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: tkato@vos.nagaokaut.ac.jp

[3]正会員　北海道大学大学院工学院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

トリップ全体ではシステム最適（SUE），局所的には利用者均衡（UE）に従う交通量配分モデルを提案する．本研究では交通情報の観測精度が道路ネットワーク内を区分するエリアごとで異なる状況を考える．確度の高い交通情報を提供できるエリアが存在する一方で，その他のエリアでは確度が劣後した交通情報しか得られない場合，ドライバーが認知する交通情報の精度はエリアごとで異なるため，トリップの全体で単一の経路選択基準を適用できなくなる．本研究では例として，道路ネットワークの一部エリア内の経路選択は UE に従うが，トリップ全体の経路選択は SUE に従う状況を検討する．本研究で導入する仮想ネットワークを用いると，提案する経路選択基準に従う交通量配分モデルは UE に制約された SUE として定式化される．テストネットワークを用いた数値計算例と今後の研究の方向を併せて示す．

Key Words: *autonomous vehicles, path choice criteria switching, traffic information*

1. はじめに

自動運転車の普及を前提とする道路ネットワーク分析のための手法が広く開発されているものの[1,2]，完全自動運転を実現するまでに克服すべき，技術的・社会的な課題は数多い．そのため，道路インフラによる自動運転支援が行われる場合に限り，自動運転機能を発揮できる準自動運転車（SAV）の普及を前提とする，道路ネットワーク分析モデルの開発が近年行われている．[3)]

SAV の場合，自動運転機能を支援する道路インフラが存在する道路空間（SAV ゾーン）においてのみ，完全自動運転車としてふるまうため，トリップの途中で自動運転車と手動運転車が切り替わるような仮定が置かれている．特に近年は，SAV と SAV ゾーンの設定を前提として，トリップの途中で経路選択基準が切り替わることを仮定した交通量配分モデルの開発が行われている．[1-2)]これらの研究では，走行支援する道路インフラが存在する道路空間（SAV ゾーン）では，経路選択を自動運転車に任せる一方で，それ以外の場合では人間が経路選択を行うという仮定が置かれている．SAV 専用ゾーンの内外で経路選択規準を切り替えることを想定した，いずれの研究においても，SAV ゾーン内では自動運転車はシステム最適 (SO) に従って経路を選択し，SAV ゾーンを含むトリップ全体では利用者均衡（UE）に従うという仮定が置かれている．しかし，いずれの研究も局所的には SO，大域的には UE に従う経路選択行動を定式化するために特殊な仮定を設けており，厳密な意味で，提案する経路選択規準の定義を満たす経路選択規準の定式化は筆者の知る限り提案されていない．トリップ全体で UE を定義する場合，SAV ゾーンを通過するときの移動時間を特定する必要がある．SAV ゾーン内が UE に従う場合は，SAV ゾーンを出入りするノード（境界ノード）間の移動時間は SAV ゾーン内の経路に依存せず等しい．しかし，SAV ゾーン内が SO に従う場合，SAV ゾーン内の経路によって移動時間はバラバラとなる．既往研究では SAV ゾーン内の移動時間を特定するために仮定を置いている．例えば，Chen et al.[4)] は SAV ゾーンの境界ノード間を結ぶ経路のうち，移動時間が最小となる経路の移動時間を代表させている．一方，Roy et al.[5)]境界ノード間に複数存在する経路移動時間の平均を代表させている．

しかし，いずれの仮定においても，トリップ全体の SUE は厳密な意味で満たされない．

そこで本研究では，既往研究の設定にかわり，SAV ゾーン内では UE，SAV ゾーンを含むトリップ全体では確率的利用者均衡（SUE）に従う経路選択規準を検討する．従来の研究では SAV ゾーン内外において SAV の経路選択を中央制御できるか否かに着目していたが，本研究では SAV ゾーン内外で取得できる交通情報の精度の違いに着目する．SAV ゾーンでは SAV のみが走行するため高精度な交通情報を観測・共有可能である一方で，非 SAV ゾーンでは取得できる交通情報が劣後するものとする．本研究で検討する経路選択規準に基づく交通量配分モデルを以下で提案する．提案する交通量配分モデルは，部分的な道路ネットワークが局所的に UE によって制約された SUE として定式化される．SAV ゾーンと非 SAV ゾーンの境界となるノード（境界ノード）を経由する OD 交通需要を明示的に定義すると，SAV ゾーン内の UE と O-D 間の SUE がそれぞれ定式化できることを示す．

本研究の構成は以下の通りである．第 2 章では本研究で提案する交通量配分モデルを示す．第 3 章ではテストネットワークにおける計算結果を示す．最後に本研究をまとめ，今後の展望について述べる．

2. モデル

(1) 記号と仮定

本研究で使用する記号は以下の通りである．

N	実ネットワークにおけるノードの集合
N_b	境界ノードの集合
N_z	SAV ゾーン内（境界ノードを含まない）のノード集合
$\bar{N}_z$	非 SAV ゾーン内（境界ノードを含まない）のノード集合
$\hat{N}$	拡張ネットワークにおけるノードの集合
A	実ネットワークにおけるリンクの集合
$\hat{A}$	仮想ネットワークにおけるリンクの集合
A_z	実ネットワークにおける SAV ゾーンのリンクの集合
$\bar{A}_z$	非 SAV ゾーンのリンクの集合
$\hat{A}_z$	拡張ネットワークにおける SAV ゾーンのリンク（仮想リンク）の集合
$\hat{A}$	拡張ネットワークにおけるリンク集合
W	O-D ペアの集合
B	SAV ゾーンにおける境界ノードペアの集合
q_w	O-D ペア w 間の交通需要
$q_{w,b}$	境界ノードペア b を経由する O-D ペア w 間の交通需要
$\hat{q}_b$	SAV ゾーンにおける境界ノードペア b 間の交通需要
K_w	拡張ネットワークにおける，O-D ペア w 間の経路の集合
$f_{w,k}$	拡張ネットワークにおける O-D ペア w 間の経路 k の交通量
v_a	リンク交通量
c_a	リンク交通容量
	リンク移動時間関数のパラメータ
t_a	リンク移動時間
$t_{w,k}$	経路移動時間
$\hat{t}_{b,k'}$	SAV ゾーン内の境界ノード b 間の経路k'の移動時間
$\hat{\mu}_b$	境界ノード間の最小移動時間
$\delta_{w,k,a}$	拡張ネットワークにおいて O-D ペア w 間の経路 k がリンク a を通過するときに 1，それ以外のときに 0 をとる変数
$\hat{\delta}_{b,k',a'}$	SAV ゾーン内の部分ネットワークにおいて境界ノードb間の経路k'がリンクa'を通過するときに 1，それ以外のときに 0 をとる変数．

本研究における仮定を以下にまとめる．

- 道路ネットワーク中には SAV のみが存在する．
- 道路ネットワークは SAV ゾーンと非 SAV ゾーンから構成される．
- 簡単のため SAV は SAV ゾーンを必ず 1 回通過する．
- SAV は SAV ゾーン内では局所的に UE，SAV ゾーンを含む O-D 間は SUE に従って経路を選択する．

(2) ネットワーク表現

本研究で仮定する経路選択行動を図-1 上に示す実道路ネットワーク，$G(N,A)$と図-1 下に示す拡張ネットワーク，$\hat{G}(\hat{N},\hat{A})$を用いて説明する．ドライバーの経路選択行動について，SAV ゾーン内は UE，SAV ゾーンを含む O-D 間は SUE に従うと仮定する．SAV ゾーンの外を非 SAV ゾーンとするとき，SAV ゾーンと非 SAV ゾーンの境界となるノードを境界ノードと呼ぶ．ここで，SAV ゾーンと非 SAV ゾーンを構成するリンクの集合をそれぞれA_zと$\bar{A}_z$とする．また，SAV ゾーンおよび非 SAV ゾーンを構成するノードの集合をそれぞれN_zと$\bar{N}_z$とする．なお，N_zと$\bar{N}_z$それぞれは境界ノードの集合N_bは含まないものとする．

SAV ゾーン内は UE に従うため，任意の境界ノード間の移動時間は SAV ゾーン内の経路に依らず等しい．したがって，O-D ペア間の SUE を考える際は，SAV ゾーン内の経路を考える必要はない．そこで，任意の境界ノード間を結ぶ仮想リンクを考える．ここで，仮想リンクのコストは任意の境界ノード間の最小移動コストに対応する．最小移動時間は UE によって定義づけられる．また，仮想リンクの集合を$\hat{A}_z$とする．SAV ゾーンと対応する

部分ネットワーク中の任意の境界ノード間を結ぶすべての実リンクを仮想リンクで置き換えると，図-1 下のような拡張ネットワーク，$\hat{G}(\hat{N},\hat{A})$を定義できる．ここで，$\hat{N}=N_z\cap N_b$であり，$\hat{A}=\bar{A}_z\cap\hat{A}_z$である．本研究で提案する経路選択行動は拡張ネットワークにおける O-D 間の SUE を考えることと等価である．以下では基本的に拡張ネットワークを想定して議論を行う．

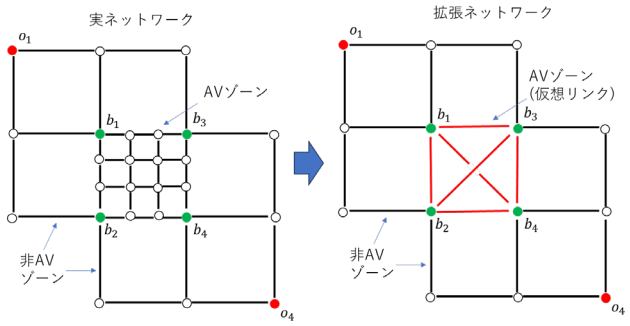


図-1 経路選択規準のネットワーク表現

(3) 交通流と移動時間

O-D ペア w 間の交通需要 q_w が与えられるとき，さらに境界ノードペア b を経由する交通需要 $q_{w,b}$ は以下のような関係を持つ．

$$q_w=\sum_{b\in B}q_{w,b}\quad\forall w\in W \tag{1}$$

SAV ゾーンのみに注目すると，境界ノードペア b 間の交通需要は関係する $q_{w,b}$ の総和として以下のように与えられる．

$$\hat{q}_b=\sum_{w\in W}q_{w,b}\quad\forall b\in B \tag{2}$$

拡張ネットワークにおける O-D ペア w 間の経路集合を $\hat{K}_w$ とするとき，交通需要と経路交通量，リンク交通量はそれぞれ以下のような関係を持つ．

$$q_w=\sum_{k\in\hat{K}_w}f_{w,k}\quad\forall w\in W \tag{3}$$

$$v_a=\sum_{w\in W}\sum_{k\in\hat{K}_w}f_{w,k}\cdot\delta_{w,k.a}\ \forall a\in\hat{A} \tag{4}$$

実ネットワークを構成するリンク，すなわち SAV ゾーンおよび非 SAV ゾーンの実リンクの移動時間は以下のような BPR 関数で表されるものとする．

$$t_a(v_a)=t_{0,a}\cdot\left(1+\alpha_a\cdot\left(\frac{v_a}{c_a}\right)^{n_a}\right)\forall a\in A_z\cap\bar{A}_z \tag{5}$$

なお，拡張ネットワークにおいては非 SAV ゾーンのリンクのみ式(5)で移動時間が定義される一方で，仮想リンクの移動時間，すなわち SAV ゾーンにおける境界ノード間の最小移動時間は後述の 2. (4) に示す SAV ゾーン内の利用者均衡問題と対応付けられる．拡張ネットワークにおける経路移動時間は以下の通りである．

$$t_{w,k}=\sum_{w\in W}\sum_{k\in\hat{K}_w}t_a\cdot\delta_{w,k,a}\quad\forall a\in\hat{A} \tag{6}$$

(4) SAV ゾーン内の利用者均衡

式(2)より SAV ゾーン内では $\hat{q}_b\ \forall b\in B$ を交通需要とみなせる．SAV ゾーン内では境界ノード間の交通需要が与えられたとき，境界ノード間の最小移動時間がわかればよい．SAV ゾーン内の任意の境界ノード間の交通需要，経路交通量，リンク交通量の関係はそれぞれ以下の通りである．

$$\hat{q}_b=\sum_{k'\in\hat{K}_b}\hat{f}_{b,k'}\quad\forall b\in B \tag{7}$$

$$v_{a'}=\sum_{b\in B}\sum_{k'\in\hat{K}_b}\hat{f}_{b,k'}\cdot\hat{\delta}_{b,k',a'}\quad\forall a'\in A_z \tag{8}$$

SAV ゾーン内の実リンクの移動時間は(5)の通りである．したがって，SAV ゾーン内の境界ノード間の経路移動時間は以下のように表される．

$$\hat{c}_{b,k'}=\sum_{a'\in A_z}t_{a'}\cdot\hat{\delta}_{b,k',a'}\quad\forall b\in B,k'\in\hat{K}_b \tag{9}$$

したがって，SAV ゾーンの任意の境界ノード間の利用者均衡問題は以下のような相補性問題として定義される．

$$\hat{f}_{b,k'}\cdot(\hat{c}_{b,k'}-\mu_b)=0\quad\forall b\in B,k\in\hat{K}_b \tag{10}$$

$$\hat{f}_{b,k'}\geq 0,\hat{c}_{b,k'}-\mu_b\geq 0\quad\forall b\in B,k\in\hat{K}_b \tag{11}$$

$$\left(\hat{q}_b-\sum_{k\in\hat{K}_b}\hat{f}_{b,k'}\right)\cdot\mu_b=0\quad\forall b\in B \tag{12}$$

$$\hat{q}_b-\sum_{k\in\hat{K}_b}\hat{f}_{b,k'}\geq 0,\mu_b\geq 0\quad\forall b\in B \tag{13}$$

(5) 局所的には UE に従う SUE

ロジット型の SUE を仮定すると，拡張ネットワークにおける O-D ペア w 間の経路 k の一般化移動コストは以下のように定義される．

$$c_{w,k}=t_{w,k}+\frac{1}{\theta}\cdot\ln\frac{f_{w,k}}{q_w}\quad\forall w\in W,k\in K_w \tag{14}$$

提案する経路選択規準に基づく交通量配分モデルを以下のように，相補性制約付きの VIP として示す．

$$\sum_{w\in W}\sum_{k\in K_w}c_{w,k}\cdot\left(f_{w,k}-f^*_{w,k}\right)\geq 0 \tag{15}$$

s.t. (1)-(14)

3. 数値計算

(1) 設定

2.で定式化したモデルを用いて数値計算を実施した．本研究で用いたテストネットワークを**図-2** に示す．**図-2** の上は実ネットワーク，下は仮想ネットワークである．実ネットワークは 16 リンク，10 ノードから構成される．O-D ペアは o_1-d_1，o_1-d_2，o_2-d_1，o_2-d_2 の 4 組である．テストネットワークは中央に SAV ゾーンを持

ち，境界ノードはb_1からb_4の 4 つである．境界ノード間のペアはb_1-b_3，b_1-b_4，b_2-b_3，b_2-b_4の4組である．拡張ネットワークにおける境界ノード間を結ぶ仮想リンクは境界ノードペア数だけ定義できる．O-D 交通需要は**表-1** の通りである．また，O-D ペアと境界ノードを通過する組み合わせは**表-2** の通りである．

式(14)の一般化移動コストに対応する，2. (5)の交通量配分問題における O-D ペア w 間の経路 k を選択する確率を以下の通りである．

$$p_{w,k}=\frac{\exp\left(-\theta\cdot t_{w,k}\right)}{\sum_{k\in\hat{K}_w}\exp\left(-\theta\cdot t_{w,k}\right)} \quad \forall w\in W, k\in\hat{K}_w \tag{16}$$

ここで，$\mathbf{p}=\left[p_{w,k}\ \forall w\in W, k\in\hat{K}_w\right]$とする．(15)を不動点問題として以下のように再定式化して，2. (5)の問題を解く．

$$\mathbf{p}=\mathbf{p}(\mathbf{f}) \tag{17}$$

ここで，$\mathbf{f}=\left[f_{w,k}\ \forall w\in W, k\in\hat{K}_w\right]$.

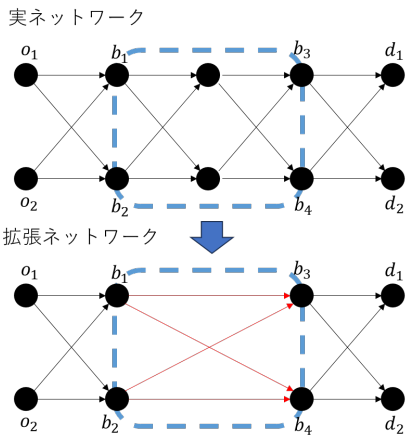


図-2　テストネットワーク

表-1　O-D 交通需要

始点	終点	交通需要
o_1	d_1	100
o_1	d_2	50
o_2	d_1	40
o_2	d_2	60

表-2　O-D ペアと境界ノードの通過組み合わせ

$o_1-b_1-b_3-d_1$	$o_2-b_1-b_3-d_1$
$o_1-b_1-b_3-d_2$	$o_2-b_1-b_3-d_2$
$o_1-b_1-b_4-d_1$	$o_2-b_1-b_4-d_1$
$o_1-b_1-b_4-d_2$	$o_2-b_1-b_4-d_2$
$o_1-b_2-b_3-d_1$	$o_2-b_2-b_3-d_1$
$o_1-b_2-b_3-d_2$	$o_2-b_2-b_3-d_2$
$o_1-b_2-b_4-d_1$	$o_2-b_2-b_4-d_1$
$o_1-b_2-b_4-d_2$	$o_2-b_2-b_4-d_2$

(2)　結果

繰り返し回数を11回として提案する交通量配分問題を解いた．**図-3**と**図-4**はそれぞれ拡張ネットワークにおけるリンク交通量（非SAVゾーンにおけるリンクとSAVゾーンに対応する仮想リンク）とSUEを部分的に制約するUEによって定義されるSAVゾーンにおける仮想リンクの移動時間の推移をそれぞれ示している．小規模なテストネットワークであったため，5回以内の繰り返しでいずれも収束している．

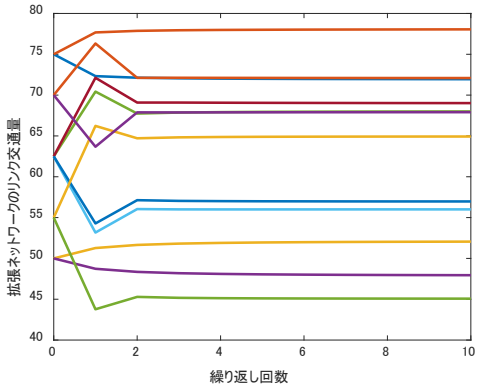


図-3 拡張ネットワークのリンク交通量

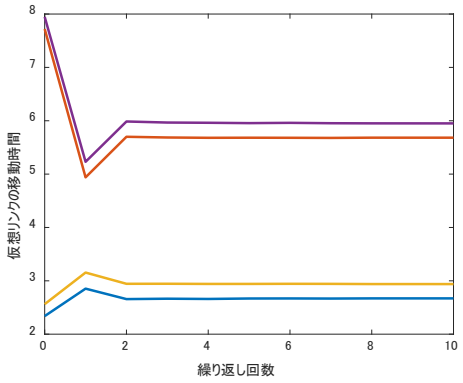


図-4 拡張ネットワークの仮想リンクの移動時間

4.　まとめ

本研究では道路区間によって車両が取得できる交通情報の精度に違いがあることを前提として，トリップ内で経路選択規準が切り替わるような交通量配分モデルを提案した．具体的には，SAV の普及を前提として，交通情報が高精度で取得できる SAV ゾーン内では車両は UE に従う一方で，O-D ペア間，すなわち SAV ゾーンを含むトリップ全体では SUE に従う経路選択規準を仮定した．提案する経路選択規準を反映した交通量配分問題は SAV ゾーンに相当する部分ネットワークにおいて UE で制約される SUE として定式化される．テストネットワークで数値計算を行った．

本研究の課題は以下の通りである．まず，解法の改

良が必要である．本研究では提案する問題について，不動点問題による定式化を示したが，SUE を最適化問題とみなすと，均衡制約付きの最適化問題（MPEC）として定式化される．MPEC の解法については，勾配を用いるもの，用いないものそれぞれのアプローチで研究が進んでおり，本研究で提案する問題への当てはめを検討する．

本研究では SAV ゾーンの設置によって，局所的には UE，トリップ全体では SUE に従う経路選択規準を検討したものの，本研究と同様な考え方を局所的には UE，トリップ全体では SO に従う経路選択規準に従う均衡問題に当てはめることも可能である．SAV ゾーンを仮定する既往の研究では SO を実現させる傾向にあることから，本研究で提案する手法によって既往のアプローチを改良することも期待できる．

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 21H01446 の助成を受けて行われた．

REFERENCES

1) Wang, J., Lu, L., Peeta, S., & He, Z. (2021). Optimal toll design problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. Transpor-tation Research Part C: Emerging Technologies, 125, 102952.
2) Wang, J., Peeta, S., & He, X. (2019). Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. Transporta-tion Research Part B: Methodological, 126, 139-168.
3) Wu, W., Zhang, F., Liu, W., & Lodewijks, G. (2020). Modelling the traffic in a mixed network with autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 134(February 2019), 101855.
4) Chen, Z., He, F., Yin, Y., & Du, Y. (2017). Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks. Transportation Research Part B: Methodological, 99, 44–61.
5) Roy, K., Hoang, N. H., & Vu, H. L. (2022). Modeling Autonomous Vehicles Deployment in a Multilane AV Zone with Mixed Traffic. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(12), 23708–23720.

(?)

TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL CONSIDERING A ROAD NETWORK WHERE TRAFFIC INFORMATION ACCURACY DEPENDS ON SUBNETWORKS

Ryuichi TANI, Teppei KATO and Kenetsu UCHIDA

We propose a novel traffic assignment model that follows system optimum (SUE) for the entire trip and user equilibrium (UE) in the subnetwork locally. In this study, we consider a situation in which the accuracy of observed traffic information differs in subnetworks. If some areas can provide highly accurate traffic information while other areas can only provide less accurate traffic information, the accuracy of traffic information perceived by drivers differs from area to area. The difference in traffic information accuracy makes it impossible to apply a single route choice criteria through the entire trip. As an example, this study considers a situation in which route choice within an area of a road network follows UE, but route choice for the entire trip follows SUE. Using the virtual network introduced in this study, a traffic assignment model that follows the proposed route choice criteria can be formulated as a SUE constrained by the UE. Numerical examples using a test network and directions for future research are also presented.