

自動運転車と普通自動車の混在流における 確率的交通容量を考慮した均衡配分モデル

石川 達也¹・加藤 哲平²・伊佐 廉斗³

¹ 非会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 2 5 5)

E-mail: t.ishikawa.857@ms.saitama-u.ac.jp

² 正会員 長岡技術科学大学 講師 環境社会基盤工学系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1 6 0 3 - 1)

E-mail: tkato@vos.nagaokaut.ac.jp (Corresponding Author)

³ 非会員 埼玉大学 工学部 環境社会デザイン学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 2 5 5)

近い将来、自動運転車 (AV) の急速な普及が予想され、過渡期には、AV と手動運転車 (HV) が混在する走行環境になると考えられる。こうした AV-HV 混在時における交通渋滞の分布を予測するためには、混在流の特性を考慮した利用者均衡配分 (UE) モデルが必要である。本研究では、車種ごとに異なる車頭間隔をもたらす交通容量の不確実性を考慮した UE モデルを提案する。提案手法を用いた数値実験を行い、AV が道路ネットワークの交通状況に与える影響についてのインプリケーションを示す。結果として、都心部の一部に AV 専用レーンを設け、車頭時間の短縮を促すことは、ネットワーク全体に好影響を与える可能性や、AV の普及による交通容量の改善が交通量の集中を招き、かえってネットワーク全体に悪影響を及ぼす可能性が示された。

Key Words: Automated vehicles, Mixed flow, Stochastic capacity, User equilibrium

1. 概要

国土交通省道路局によると^{注1}、交通渋滞による一人あたりの年間渋滞損失時間は約40時間 (H24年度プローブデータ、人口はH24.10総務省統計資料) で、乗車時間 (約100時間) の約4割に相当する。こうした課題の解決のために、交通ネットワークレベルで交通量を再現 (予測) し、そのうえで適切な道路交通施策を行う必要がある。こうしたネットワークレベルの交通量予測を目的に、均衡配分モデルが広く用いられる。交通均衡配分 (User Equilibrium (UE)) モデルには、ミクロな車両挙動をベースにしたマクロな交通流特性によって決定する交通容量などのパラメータを設定する必要がある。

一方、国土交通省は、官民 ITS 構想・ロードマップ 2017^{注2}等を基に、2025年を目途に高速道路での完全自動運転の実現を掲げている。時期は未定ではあるが、高速道路に限定しない完全自動運転の実現も見通しており、自動運転車両 (Autonomous Vehicles (AV)) の急速な普及が予想される。その結果、移行期には AV と手動運転車 (Human-driven Vehicles (HV)) の混在した走行環境が発生すると考えられる。AV 技術は、交通モビリティ、

安全性、道路環境において大きな利点を持つ。特に、AV は速度や加速度などの情報を共有することができるため、HV よりも効率的に移動し、車頭間隔を短くすることができる。したがって、リンク容量は異種車両の車頭間隔の影響を受けるため、混在走行環境の場合、現状とは異なるリンク容量になることが予想される。

UE モデルには、ミクロな車両挙動をベースにしたマクロな交通流特性によって決定する、交通容量などのパラメータを設定する必要がある。近年では、こうした交通ネットワーク上のパラメータの不確実性を、確率的に変動するものとして扱う確率的交通流理論が提案されている。

異種ドライバーを含む交通特性 (密度、速度、流量) を分析するために、Jabari ら (2014)^{注3}は確率的な FD (Fundamental Diagram) を提案した。この研究では、Newell の簡易車両追従モデル (Newell, 2002)^{注4}において最小安全距離や速度適応時間などの知覚や反応におけるドライバーの不均一性が、交通流のマクロな特性に及ぼす影響を分析している。Levin and Boyles, (2016)^{注5}は、FD を車種、すなわち AV と HV に依存する反応時間の関数としてモデル化した。この研究では、反応時間に依存す

る三角形の FD を導き出し、容量と後進波速の変動を許容するマルチクラスの Cell Transmission Model (CTM) を開発している。

FD の文脈ではないが、Ghiasi et al. (2017) ⁵⁾は、混在流におけるリンク容量の分析方法を提案した。この研究では、車種固有の車頭間隔分布を仮定することで、車両配列パターンに依存する交通容量を定義し、マルコフ連鎖モデルを用いることで混在流における交通容量を導出している。導き出されたリンク容量は、AV の普及率と隊列強度という二つのパラメータによって表現されている。Zhou & Zhu, (2020) ⁶⁾は、Ghiasi et al. (2017) が提案した方法を適用して、混在流の確率的 FD を導出した。混在交通の確率的特性と車頭間隔の不均質性を表現するために、Gaussian Mixture Model (GMM) を用いて 4 種類の車頭間隔分布をモデル化し、確率的 FD を導出した。Zheng et al. (2020) ⁷⁾は、ラグランジュ座標系に対する統計的微分方程式を適用し、自動運転車が混在交通流の不確実性と安定性に与える影響について研究した。また、彼らは交通流に HV と AV が混在する場合の平均と共分散のダイナミクスを記述する確率モデルに対して、1 次近似と 2 次近似を導出している。これらの方法は、混在交通流における重要な特性を記述することができる。しかし、Ghiasi et al. (2017) や Zhou & Zhu, (2020) , Zheng et al. (2020) で用いられる隊列強度は、外生的なパラメータであり、UE モデルで考慮される静的な交通流には適していない。例えば、UE モデルにおいてある隊列強度を仮定した場合、すべての時間帯や道路区間で均質な車両配列を仮定することになってしまう。こうした非現実的な状況ではなく、ある AV の混在率を有する道路区間における隊列強度の確率的特性自体を表現可能なモデルがあれば、混在交通流特性を考慮した UE モデルが構築可能であると考えられる。

本研究では、車種に依存する車頭間隔と車両配列の不確実性を考慮し、混在流におけるリンク容量の確率分布を導出する。確率的リンク容量は、各車種のリンク交通量によって与えられる混在率のみをパラメータに持つ変数として定式化する。さらに、このようにして得られた確率的リンク容量を考慮した UE モデルを構築する。また、数値実験を行うことで、モデルの妥当性を検証するとともに、AV が道路ネットワークへもたらす影響のインプリケーションを示す。

2. 記号

- m 車種を表す。A は自動運転車、H は普通自動車である。
- I ネットワーク上の OD ペア集合 ($m \in (A, H)$)

- J OD ペア間の経路集合
- L ネットワーク上のリンク集合
- $\delta_{l,j}^i$ リンク l がルート j に含まれる場合 1, そうでない場合 0 を取る OD ペア i の変数 ($i \in I, j \in J, l \in L$)
- P 自動運転車の普及率
- s_l リンク l における自動運転車の普及率 ($l \in L$)
- C_l リンク l における確率的リンク容量 ($l \in L$)
- q_i^m OD ペア i 間の車両 m の平均交通量 ($i \in I, m \in (A, H)$)
- $f_{i,j}^m$ OD ペア i 間の経路 j 上の車両 m の平均交通量 ($i \in I, j \in J, m \in (A, H)$)
- v_l^m リンク l 上の車両 m の平均交通量 ($l \in L, m \in (A, H)$)

3. 交通量と交通容量

(1) 交通量

A, H の OD 交通量は、OD ペア i 間の総交通量より、以下の式で与えられると仮定する。

$$q_i^A = q_i \cdot p \quad (1)$$

$$q_i^H = q_i \cdot (1-p) \quad (2)$$

交通量保存則により、リンク l および OD ペア i 間の経路 j における車種 m 交通量は以下のように表現できる。

$$v_l^m = \sum_i \sum_j \delta_{l,j}^i f_{i,j}^m \quad (i \in I, j \in J, l \in L, m \in (A, H)) \quad (3)$$

$$\sum_j f_{i,j}^m = q_i^m \quad (i \in I, j \in J, m \in (A, H)) \quad (4)$$

$$f_{i,j}^m \geq 0 \quad (i \in I, j \in J, m \in (A, H)) \quad (5)$$

また、 v_l^m を用いることで、リンク l 上の AV 車両の混在率は次のように定式化できる。

$$s_l = \frac{v_l^A}{\sum_m v_l^m} \quad (6)$$

(2) 交通容量

リンクの交通容量を導出するために、本論文では以下の基本的な仮定を設ける。

- A1) 車両追従モデルは、Newell の簡易車両追従モデル (Newell, 2002) である。
 - A2) 臨界速度は、確定的な値で与えられる。したがって、臨界車頭間隔も確定的な値で与えられる。
- A1-2 により、リンク容量は十分に大きい車両数の車列の総臨界車頭間隔の逆数として定義できる。

ここで、適当な道路区間を移動する十分に大きい n

台の車列を考える。(以降では、この n 台の車列の総臨界車頭間隔を求める。) 前後の 2 台の車両間の臨界車頭間隔は、前後の車種 ($m \in (A, H)$) の組み合わせに依存すると仮定する (Ghiasi et al, 2017, Seo & Asakura, 2017, Zhou & Zhu, 2020, Zheng et al, 2020) . 混在流における確率的リンク容量を解析的に導出するため、臨界車頭間隔は以下の 3 種類の前後の車種の組み合わせごとに与えられると仮定する (Seo & Asakura, 2017) ⁸⁾.

AA) AV が AV に追従する. この 2 台は協調して情報を共有しているため、効率的に車頭間隔を与えることができる.

HA) AV が HV に追従する. この 2 台は協調しておらず、情報も共有されていないため、AA と異なる車頭間隔を与えることができる.

H) HV が任意の車両に追従する. 先行車の車種に関係なく、追従車は手動で運転する.

これらの組み合わせにおける臨界車頭間隔をそれぞれ h_{AA} , h_{HA} , h_{-H} と表記する. 総車頭間隔は、 n 台の車列内に存在する各組み合わせの数に依存するため、 n 台の車両の配列の不確実性により、総臨界車頭間隔は確率的である.

ここで、HV が 4 台、AV が 5 台の場合を考えよう (図-1) . ただし、全車両の先頭車両は常に HV であると仮定する。(後述するが、車両数が多い場合には、この仮定はほとんど無視できる。) 総車頭間隔は車の配置パターンに依存するため、図-1 の場合、総車頭間隔 h は次式で与えられる.

$$h = 3h_{AA} + 2h_{HA} + 3h_{-H} \quad (\text{図-1 (a) and (b)}) \quad (7)$$

$$h = h_{AA} + 4h_{HA} + 3h_{-H} \quad (\text{図-1(c)}) \quad (8)$$

式(7)および(8)に示すように、 h は n 台の車列内に存在する各組み合わせの数に依存することが分かる. 一方で、式(7)に示されるように、図-1 の(a)と(b)は総車頭間隔が同一である. これは、総車頭間隔が交通流内に点在する AV 隊列 (または AV1 台) の数だけに依存するためである. 逆に、AV 隊列の長さは総車頭間隔に影響を与えない. AV 隊列がこの交通流内で存在しうる位置の候補数は、HV の車両数と同じ (この例では 4 つ) である. したがって、この場合は総車頭間隔は 4 つのパターンしか存在しないことになる. 以下で一般化する.

n 台の車両が含まれる交通流における AV 隊列の数を k とする. 車両全体の H の組み合わせの数は常に HV の数から 1 を引いた数と同じであり、A-A と H-A の組み合わせの数はそれぞれ AV の数から k を引いた数と、 k である. したがって、総車両数を n 、普及率を s_l とすると、総車頭間隔は以下のように表される.

$$h = (ns_l - k)h_{AA} + kh_{HA} + \{n(1 - s_l) - 1\}h_{-H} \quad (9)$$

ただし、配列パターンはあくまで確率的に決定されることに注意したい. ここで、 k の分布を決定するために、古典的占有問題 (Feller 1950) ⁹⁾ を考える. 古典的占有問題とは、ある数のビンに、ある数のボールがランダムに割り当てられたときに、占有されるビンの数を考える問題である. 古典的占有問題の文脈では、この数を「占有数」と呼ぶ. AV と AV 隊列の存在する位置の候補をボールとビンに見なすことで、 k は占有数と見なすことができる. 総車両数 n は十分に大きいため、Ben (2019) ¹⁰⁾ が示すように、 k は正規分布に漸近し、その平均 μ_k と分散 σ_k^2 はそれぞれ以下のように与えられる.

$$\mu_k = n \cdot (1 - s_l) \cdot \left(1 - e^{-\frac{s_l}{1 - s_l}}\right) \quad (10)$$

$$\sigma_k^2 = n \cdot (1 - s_l) \cdot e^{-\frac{s_l}{1 - s_l}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{s_l}{1 - s_l}}\right) \quad (11)$$

したがって、式(9)に示される総車頭間隔は正規分布の線形変換と考えることができる. これにより、総車頭間隔は正規分布に漸近し、その平均 μ_h と分散 σ_h^2 はそれぞれ以下のように与えられる.

$$\mu_h = ns_l h_{AA} + \{n(1 - s_l) - 1\}h_{-H} + (h_{HA} - h_{AA})\mu_k \quad (12)$$

$$\sigma_h^2 = (h_{HA} - h_{AA})^2 \sigma_k^2. \quad (13)$$

また、総旅行時間は、 $n - 1$ 個の先行車・追従車ペアの旅行時間の総和と考えることもできる. A1 によれば、車頭間隔は自身の車種と先行車の車種のみ依存し、先行車の先行車や後続車の挙動には影響を受けない. したがって、総車頭間隔は互いに独立な確率変数の総和であると考えられる. n は十分に大きいと仮定すると、 $n/(n-1) \approx 1$, $1/(n-1) \approx 0$ であり、平均 $\mu(s_l)$ と分散 $\sigma^2(s_l)$ はそれぞれ以下のように与えられる.

$$\mu(s_l) = s_l h_{AA} + (1 - s_l)h_{-H} + (h_{HA} - h_{AA}) \cdot \left(\frac{\mu_k}{n}\right) \quad (14)$$

$$\sigma^2(s_l) = (h_{HA} - h_{AA})^2 \cdot \frac{\sigma_k^2}{n}. \quad (15)$$

ここで、 $\mu(s_l)$ および $\sigma^2(s_l)$ はそれぞれ混在率 s_l の関数であることを表す. また、交通容量は総車頭間隔の逆数で与えられるため、交通容量の逆数は、上記の平均 $\mu(s_l)$ と分散 $\sigma^2(s_l)$ を持つ正規分布に従う点に注意したい.

4. UE モデル

(1) 旅行時間

リンク l の旅行時間は次式で示される BPR 関数で与えられると仮定する。

$$t_l(X_l) = t_{l0} + t_{l0}\alpha_l \cdot (X_l)^{\beta_l} \quad (16)$$

where,

$$X_l = \frac{\sum v_l^m}{C_l} \sim N(v_l\mu(s_l), v_l^2\sigma^2(s_l)). \quad (17)$$

ここで、 t_{l0} はリンク l の自由走行時の平均旅行時間 ($l \in L$)、 α_l, β_l はリンク l のパラメータ ($l \in L$)、 C_l はリンク l における確率的リンク容量 ($l \in L$) をそれぞれ表す。なお、リンク l の交通量と交通容量は、2 種類の車両の交通量で与えられる。Clark and Watling (2005)¹¹と同様に、(16)をテイラー展開することで平均旅行時間を算出する。 $X_l = E[X_l]$ を中心に(16)を w 次テイラー展開すると、

$$t_l(X_l) = \sum_{r=0}^w b_l^r \cdot (X_l - E[X_l])^r. \quad (18)$$

where,

$$b_l^r = \frac{1}{r!} \cdot \frac{\partial^r t_l(X_l)}{\partial (X_l)^r} \Big|_{X_l=E[X_l]}. \quad (19)$$

したがって、平均リンク旅行時間は以下のように計算できる。

$$t_l(X_l) = \sum_{r=0}^w b_l^r \cdot E[(X_l - E[X_l])^r]. \quad (20)$$

OD ペア i 間の経路 j の経路旅行時間は以下のように計算できる。

$$E[\Xi_{ij}] = \sum_{l \in L} E[t_l(X_l)] \cdot \delta_{ij} \quad \forall j \in J_i, i \in I. \quad (21)$$

(2) 利用者均衡問題

ネットワーク上のドライバーは平均経路旅行時間のみを考慮して経路を選択すると仮定する。この時、UE 条件は以下の非線形相補性問題 (UE-NCP) で与えられる。[UE-NCP]:

$$\mathbf{f}^T \cdot E[\Xi_{ij}(\mathbf{f})] = 0, \mathbf{f} \geq 0, E[\Xi_{ij}(\mathbf{f})] \geq 0. \quad (22)$$

Lo and Chen (2000)¹²に示されているように、UE-NCP の解は、以下の Fischer-Burmeister 関数 (Fischer, 1992)¹³の最小化問題を解くことによって得ることができる。

$$\min_{\mathbf{f}} : \psi(\mathbf{f}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \phi(f_{ij}^m, E[\Xi_{ij}(\mathbf{f})]). \quad (23)$$

where,

$$\phi(a, b) = \left(a + b - \sqrt{a^2 + b^2} \right)^2. \quad (24)$$

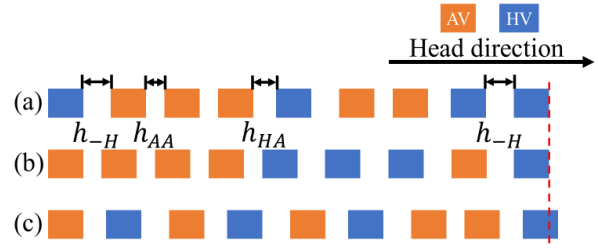


Fig-1 車両配列の例

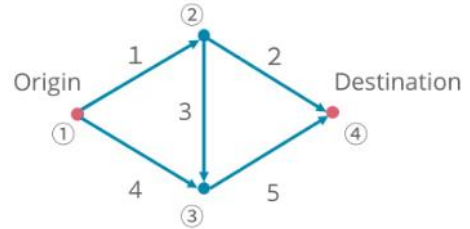


図-2 テストネットワーク

表-1 BPR 関数に関するパラメータ設定

l (リンク No.)	t_{l0}	α_l	β_l
1	1	0.15	4
2	1	0.15	4
3	0.5	0.15	4
4	1	0.15	4
5	0.5	0.15	4

5. 数値実験

(1) 実験 1

図-2 に示すような 4 つのノードと 5 つのリンクからなるテストネットワークに提案手法を適用し、数値実験を行った。図-2 において、ノードとリンクの周りに表記されている数字は、ノード番号とリンク番号を表している。

OD ペアはノード 1 からノード 4 までの 1 組で、これらの OD ペアを結ぶ経路は 3 つ存在する。それぞれの経路を構成するリンク配列は $\{1, 2\}, \{1, 3, 5\}, \{4, 5\}$ である。OD の総交通量は 5000 (台/時) の AV, HV である。BPR 関数のパラメータは表-1 のように設定した。

平均リンク旅行時間については、 $X_l = E[X_l]$ を中心に、(20)を 2 次テイラー展開することで次式とした。

$$t_l(X_l) = t_{l0} + t_{l0}\alpha_l (v_l\mu)^{\beta_l} + \frac{1}{2} t_{l0}\alpha_l\beta_l (\beta_l - 1)(v_l\mu)^{\beta_l - 2} v_l^2\sigma^2. \quad (25)$$

上記の条件のもと、移行期を考慮した場合と将来の AV 技術シナリオを考慮した場合において、普及率の変化による均衡条件の変化を検討した。AV 普及率を 0 から 1 まで 0.2 ずつ、 h_{AA} を 0.5 から 1.5 まで 0.2 ずつ変化させて平衡状態を分析した。その他の臨界車頭間隔は、

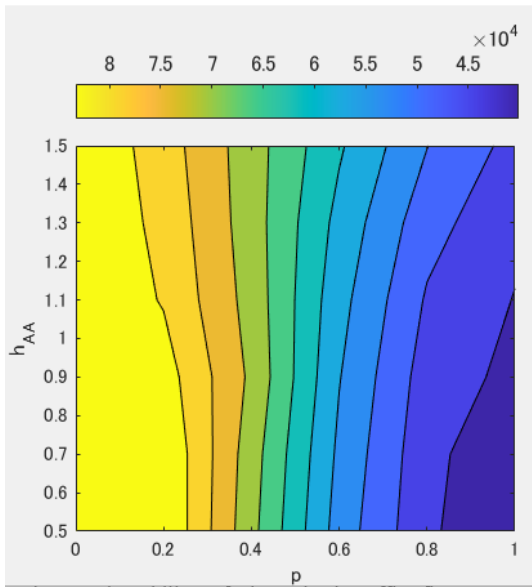


図-3 総旅行時間の変化

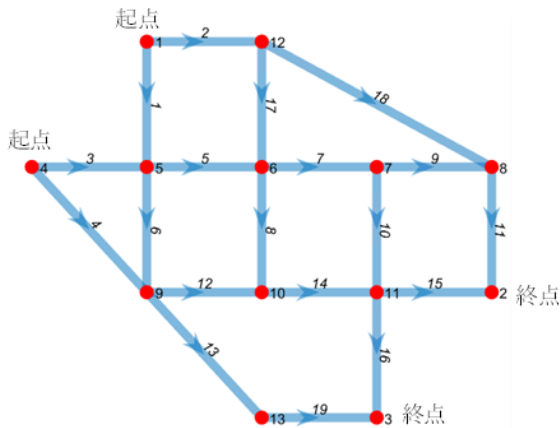


図4 テストネットワーク

$h_{HA} = 2.0, h_H = 2.5$ とした。

数値計算の結果を図-3に示す。図-3は、横軸に AV 普及率 p 、縦軸に AV-AV 間の車頭間隔 h_{AA} をとり、各均衡状態における総期待旅行時間を等高線としてプロットしたものである。 $p = 0$ の場合、全ての車両が HV であることを示しているため、車頭間隔は $h_H = 2.5$ のみ存在していることになり、総旅行時間は一定の値を取る。一方で、 $p = 1$ の場合、車頭間隔 h_{AA} のみに依存した総旅行時間となる。結果より、AV 移行期 ($0 \leq p < 0.5$) において、 h_{AA} が減少することで総旅行時間が増加している。このような現象は、あくまで UE モデルは自身の旅行時間を最小化するような行動を想定していることや、交通容量が AV 混在率に依存しているために、微小な交通量しか流れないリンクがある場合、テストネットワークの総旅行時間が過敏に変化することによるものであると考えられる。AV が普及した場合 ($0.5 \leq p \leq 1.0$) に

表-2 経路と通過リンクの一覧

OD	ODペア	経路	通過リンク
1	1-2	1	2-18-11
		2	1-5-7-9-11
		3	1-5-7-10-15
		4	1-5-8-14-15
		5	1-6-12-14-15
		6	2-17-7-9-11
		7	2-17-7-10-15
		8	2-17-8-14-15
		2	4-2
10	3-5-7-9-11		
11	3-5-7-10-15		
12	3-5-8-14-15		
13	3-6-12-14-15		
3	1-3	14	1-6-13-19
		15	1-5-7-10-16
		16	1-5-8-14-16
		17	1-6-12-14-16
		18	2-17-7-10-16
		19	2-17-8-14-16
		4	4-3
21	4-12-14-16		
22	3-6-13-19		
23	3-5-7-10-16		
24	3-5-8-14-16		
25	3-6-12-14-16		

において、 p が増加すると、混在流の中で h_{AA} の割合が増加し、 h_{AA} の値が減少することで、総旅行時間が減少する。このとき、AV 普及率が 1 に近づくにつれ、 h_{AA} の減少は、より大きな総旅行時間の短縮効果を示している。したがって、AV が普及した場合、 h_{AA} は総旅行時間の短縮に大きく寄与している。よって、道路ネットワークの効率化のためには、AV の普及を促進し、十分に AV が普及した後、車頭間隔を更に短縮するための AV 技術開発を行うことが重要であると考えられる。また、総旅行時間の短縮に、AV 普及率の増加が重要であることから、ネットワーク全体の効率性を高める上では、AV の普及を促すような施策が必要であると考えられる。

(2) 実験 2

実験 2 において使用するテストネットワークは、図-4 に示すノード数 13、リンク数 19 で構成された Nguyen-Dupuis ネットワーク (1984)¹⁴⁾ である。各ノード・リンク上の数字は、ノード・リンク番号をそれぞれ表す。OD ペアは (起点-終点) = (1-2) (4-2) (1-3) (4-3) の 4 組であり、経路は表-2 の通り 25 組ある。

以下では、リンク 1,3,15,16 を除く外周のリンクを「郊外部」、残りのリンクを「都心部」と呼称する。各リンクの BPR 関数のパラメータは、 $\alpha_i = 0.15, \beta_i = 4$ とし、

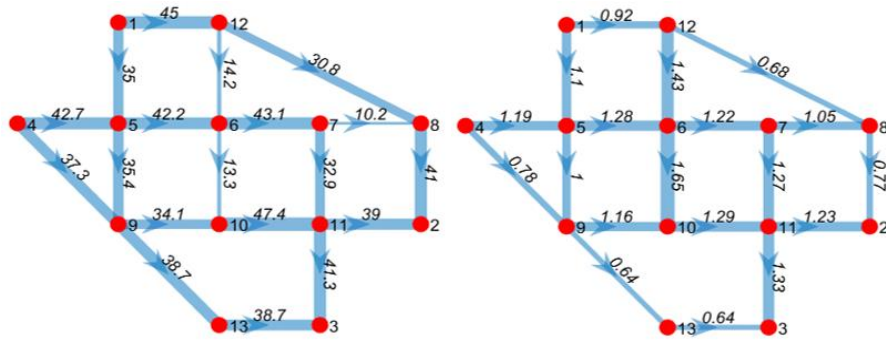


図-5 AV 普及率=30%のときのリンク交通量 (左) 及びS値 (右)

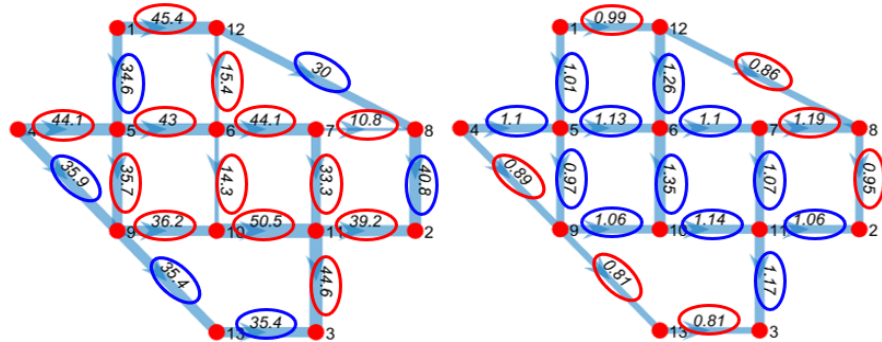


図-6 AV 普及率=50%のときのリンク交通量 (左) 及びS値 (右)

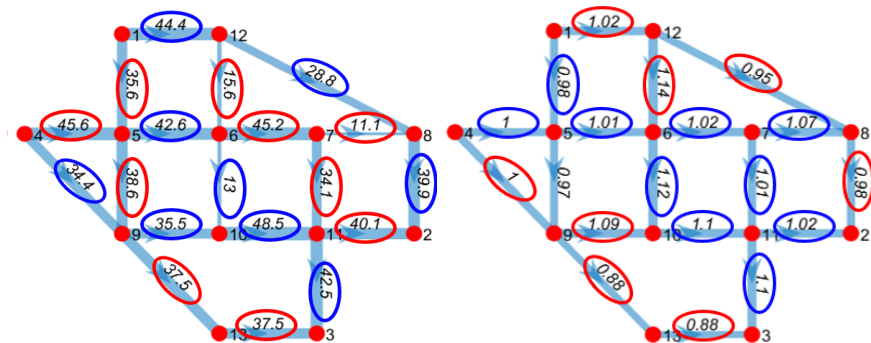


図-7 AV 普及率=70%のときのリンク交通量 (左) 及びS値 (右)

t_{10} は、リンク 4,13 では 2、リンク 18 では 3、その他のリンクでは 1 と設定した。車頭時間は Amaout and Bowling (2014)¹⁵⁾ を基に、 $h_{HA} = 0.5, h_{HA} = 0.9, h_{-H} = 1.4$ とし、OD 交通量は等しく 40 (台/分) に設定した。

この実験では、AV 普及率の変化に対するネットワーク中の交通量および旅行時間の変化を示す 3 つの数値実験を行った。

まず、AV 普及率を 30%,50%,70%の三段階で変化させ、均衡状態を再現したときのリンク交通量及び AV 普及率に対する各リンクの AV 混在率 (以降 S 値とする) を観測する。結果を図-5,6,7 に示す。図-6 では、図-5 のリンクと比較して数値が増加しているものには赤線、減少しているものには青線で囲みをつけている。同様に、図-7 では図-6 と比較し、囲みをつけている。

リンク交通量に着目すると、リンク毎に大差なく交通量を保つ郊外部に対し、都心部では交通量に偏りがある。つまり、ネットワーク上に交通量の多い経路と、それらを繋ぐ交通量の少ないリンクが存在している。これらは、実生活において混雑を緩和するために設けられたバイパス道路と一般の道路の関係に類似しており、混在流におけるバイパスの働きは AV 普及率が増加しても発揮されるといえる。また、交通量の少ないリンクの S 値に着目すると、複数のリンクにおいて高い値を示しているため、AV 混在率の高いリンクは、ごく少量の HV と、少量の AV で構成されることが分かる。これは、相互に情報の共有ができる AV による混雑の緩和効果が、AV 混在率の高いリンクにおいて効果的であると考えられ、既存研究で議論されている AV 専用レーンの有効性を示唆して

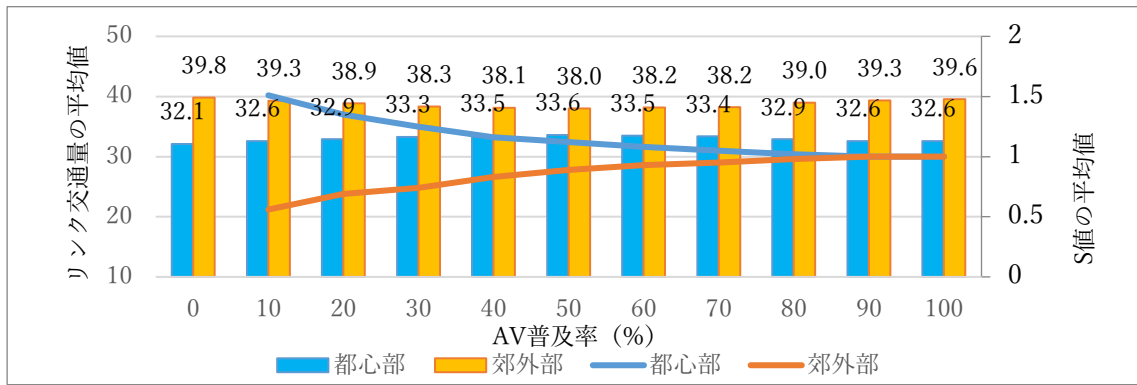


図-8 $h_{AA} = 0.5$ のとき

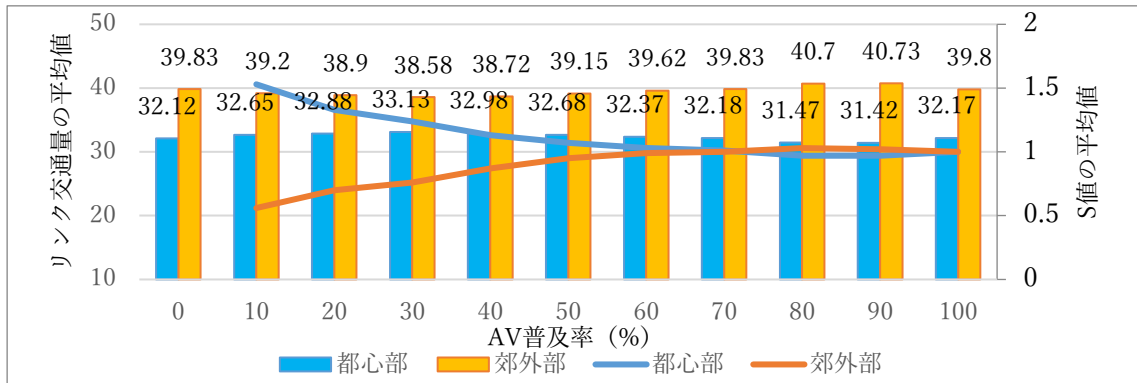


図-9 $h_{AA} = 0.7$ のとき

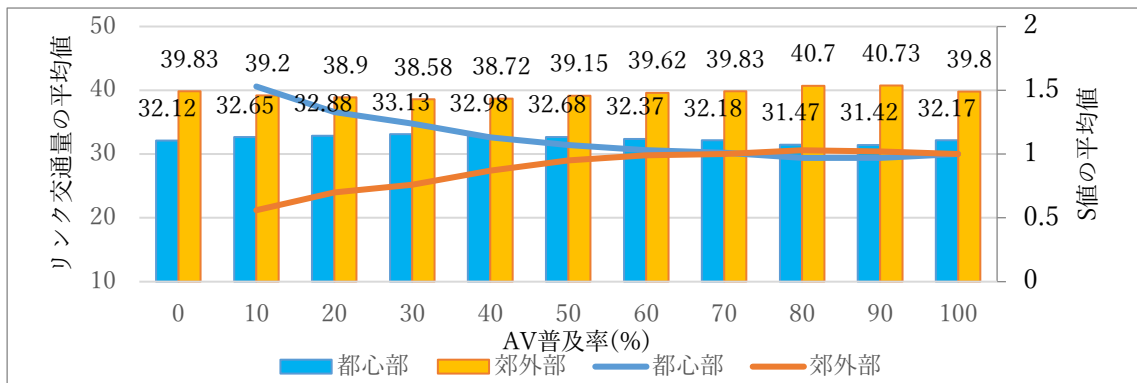


図-10 $h_{AA} = 0.9$ のとき

いる。

3つの図を比較すると、リンク交通量とS値の変化は都心部と郊外部で大別できることがわかる。そこで、AV普及率の増加に伴うリンク交通量とS値の変化を、エリア毎に分けて詳しく検証するため、AV普及率を0%から100%まで10%刻みで動かし、そのときのリンク交通量とS値の変動を観測する。(AV普及率0%時のS値は定義できないため、省略している。)まず、リンクを都心部と郊外部に分け、それぞれのリンク交通量とS値の平均値を図にまとめる。リンク交通量は棒グラフ、S値は折れ線グラフで表し、横軸にAV普及率、第1縦軸

にリンク交通量の平均値、第2縦軸にS値の平均値を記載する。図-8,9,10において、AV-AV間の車頭時間 h_{AA} をそれぞれ0.5,0.7,0.9と設定した。S値の変遷をみると、都心部と郊外部の値は1を境に対称的に増減する。AV普及初期に高い値を示す都心部のS値は、普及が進むにつれ徐々に低下し、あるAV普及率で郊外部のS値とともに1となる。その後、都心部のS値は1を下回るようになり、郊外部のS値が1を上回るようになる。

リンク交通量の変遷に着目すると、AV普及初期(AV普及率0~30%程度)においては、郊外部の交通量が徐々に都心部に移り、都心部の交通量が増加する。このよう

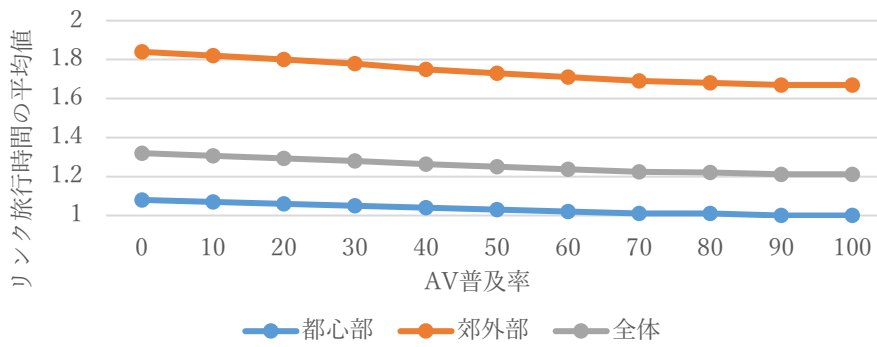


図-11 リンク旅行時間の平均値

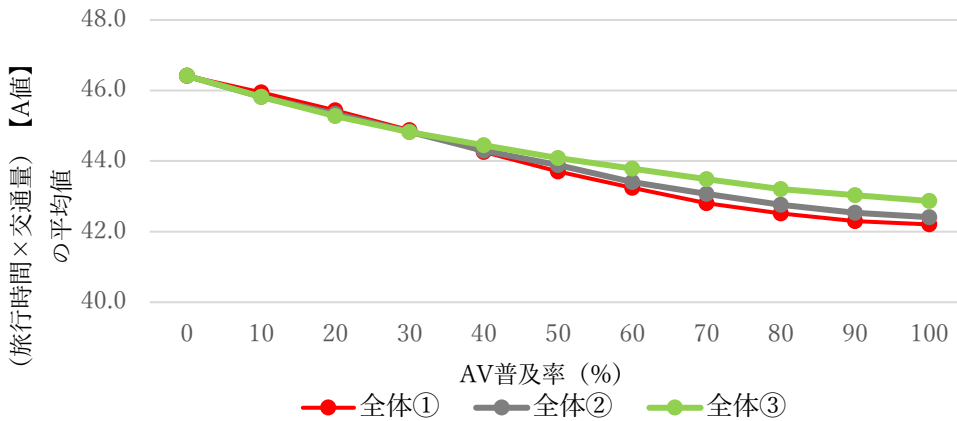


図-12 全体のA値の平均値

な現象は、車頭間隔を縮めることでリンク交通容量を増加させることが可能な AV の特性が、リンクの入り組む都心部においてより効果的に発揮されるために起こると考えられる。都心部では、単一のリンクが複数の経路に内包されているため、1つのリンク交通容量の改善が複数の経路旅行時間を低減させる効果がある。その結果、都心部を通過する複数の経路の交通量が増加し、先述の現象が観測されると推察できる。

図 9.10 において、AV 普及中期となり AV 普及率が 30~50%まで進むと、郊外部において交通量が増加し始める。これは都心部において、増加した交通量による旅行時間の増加が、交通容量の改善効果を上回ったことで、郊外部へ交通量が流れ始めたことが要因だと考えられる。この増加は普及後期まで続き、郊外部の S 値が 1 を超えるようになると、郊外部の交通量は普及初期の最大値を超える。

上記の数値解析の結果から、AV 普及率が遷移するにつれて交通均衡配分時のエリア毎の AV 混在率が変化するため、その時点の AV 普及率において効率的な交通量配分になるように、AV の交通量を制御することも有効であると考えられる。次の実験では旅行時間に注目し、AV の混在によるネットワークの効率性について分析する。

本研究で示した均衡配分において、運転手は経路を選択するときに、旅行時間のみを考慮する。また、運転手が経験する旅行時間の総和は、各リンク旅行時間と各リンク交通量の積の総和で与えられる。そこで、リンク別に旅行時間と交通量の積 (A 値とする) を求め、それらの平均値を AV 普及率ごとに並べグラフ化する。先ほどと同様に、リンクは都心部と郊外部で区別し、AV 普及率は 0% から 100% まで 10% 刻みで変化させる。

まず、各エリアのリンク旅行時間の総和をそのエリア内のリンク数で割ったリンク旅行時間の平均値をグラフ化する。図-11 では AV 普及率別リンク旅行時間の平均値を、都心部、郊外部、全体の 3 つに分けて表す。

図-11 より、自由旅行時間が大きく設定された 3 つのリンクを含む郊外部では、リンク旅行時間が高くなっていること、AV 普及率の進展に伴い、リンク旅行時間は緩やかに低下する様子がみられる。次に、運転手が経験する旅行時間の平均値について議論するために A 値の平均値を図示する。A 値は利用者が経験する旅行時間を表す指標であり、値が小さいほど、利用者均衡配分の時間短縮効果の評価指標に貢献すると考えられる。AV-AV 間の車頭間隔 h_{AA} を① 0.5, ② 0.7, ③ 0.9 の 3 通りで変化させ、1 つの図にまとめている。図中の①-③はそれぞれ AV の車頭間隔の設定①-③に対応している。

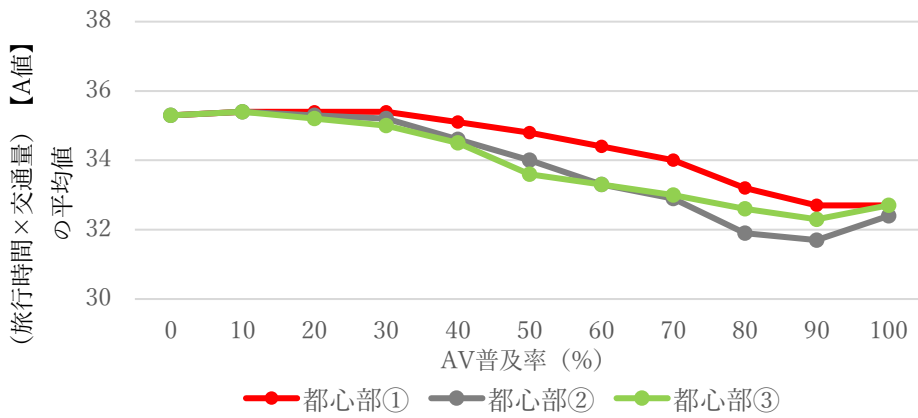


図-13 都心部の A 値の平均値

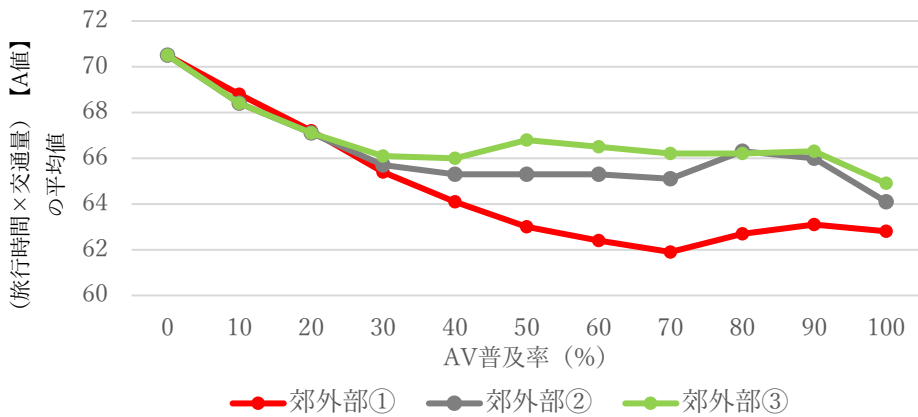


図-14 郊外部の A 値の平均値

図-12 より、ネットワーク全体の A 値平均は AV 普及率の増加に伴い単調減少している。要因としては、各リンクの旅行時間が減少していることや、均衡配分により自由旅行時間が大きい郊外部のリンクにおける交通量が減少している (図-6,7) ことが考えられる。これは、AV 普及率の増加が利用者の旅行時間の低減に貢献することを裏付けている。

また、都心部の A 値を示す図-13 において、①のグラフは AV 同士の車頭時間を最も短く設定したにも関わらず、他のグラフよりも高い A 値を示している。これは図-8,9,10 の考察で述べた通り、交通容量の改善効果が、複数の経路を内包する都心部のリンクに強く影響を与えたために起きた現象だと推察できる。交通容量の改善効果によって増える交通量の影響が、交通容量の改善効果を卓越するため、A 値の大きさがこのような順になったと考えられる。一方、郊外部の A 値を示す図-14 によると、普及初期に 3 つのグラフに大差はないが、中期以降、車頭時間が短いグラフほど大幅に A 値が減少している。この現象は、都市部の旅行時間の増加に伴い、都心部から郊外部へ AV が流出し始めることで生じたと推察できる。以上より、AV-AV 間の車頭時間は、都市部では短くしすぎない一方で、郊外部では AV 普及中期以降において

短く設定するなど、ネットワークの特性に応じた AV の制御施策によって、より効率的な交通状態が再現されると考えられる。

さらに図-14 において、郊外部の A 値は AV 普及率 70% を超えると上昇している。これは、AV 普及率の増加による交通容量の改善効果を、都心部からの交通量の流出による交通量増加による悪影響が卓越し、結果的に総旅行時間が増加したと推察できる。この現象は、混在率の増加による交通容量の増加が非線形な特性を有しているために、特定の混在率から交通容量の増加量が逡減し始める事により生じたと考えられる。よって、車線数の増加や幅員の拡張によって自由旅行時間を低下させることで、郊外部利用者の旅行時間の増加を防止することができると考えられる。

3 つの数値解析の結果から、図-4 のようなネットワーク上で利用者均衡配分を行う場合、AV 普及率に関わらず、都心部の一部で交通量の少ないリンクが生じ、そのリンクでは AV の混在率が高いことが示された。このような配分の意図としては、AV 混在率が高いリンクでは車頭時間を短くすることが可能な AV 同士が隣接することが多く、結果的に交通容量の増加が期待できると考えられる。以上を踏まえると、都心部の一部に AV

専用レーンを設け、車頭時間の著しい短縮を促すことは、全体のネットワークに好影響を与えることを示唆している。

更に、AV の普及による交通容量の改善は、複数の経路に利用される都心部のリンクにおいて強く反映されることが示され、過度な交通容量の増加による負の影響も観測された。これらを踏まえると、実際に AV を運用する際には、車頭時間や交通量を変えながらシミュレーションを行い、AV による交通容量の改善がかえって悪影響を及ぼす恐れがないか確かめる必要がある。また、AV の最適な設定は、エリアや AV 普及率によって異なるため、実装するエリアの交通状況に合わせた運用が求められる。

6. まとめ

本研究は、AV と HV の混在流における臨界車頭間隔の不均一性と車両配列の不確実性を考慮したリンク容量の確率分布を導出した。

総車頭間隔の定式化を古典的占有問題に帰着させることで、リンク容量の確率分布について、UE モデルにおいて内生的に決定する AV 普及率のみで与えられるような定式化を行った。

数値実験を行い、AV が道路ネットワークの交通状況に与える影響を示した。実験 1 より、AV 技術の開発と AV の普及促進を同時に行えなければ、混雑状況の改善は限定的であると考えられる。実験 2 では、AV 普及率の増加に対する交通均衡配分の変化について結果をまとめた。まず、交通量と AV 混在率の変化をリンク毎に観測し、都心部と郊外部や都心部におけるリンクの交通状況の偏りを明確にした。続いて、リンク毎の交通量・AV 混在率・利用者旅行時間の 3 つの観点から交通均衡状態を考察した。都心部に交通量が少なく AV 混在率の高いリンクを観測したことから、AV 専用レーンの有用性を示した。また、AV による交通容量の改善効果が、多くの経路に利用される都心部のリンクに強く表れる可能性や、これによる交通量の増加が卓越し、ネットワークに悪影響を及ぼす可能性が存在することが示された。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 21H01446 の助成を受けたものである。

NOTES

注1) 平成 27 年 3 月 5 日 国土交通省 道路局 交通流対策について

注2) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民

データ活用推進戦略会議, 2021, 官民 ITS 構想・ロードマップ これまでの取組と今後の ITS 構想の基本的考え方

REFERENCES

- 1) 日下部 貴彦, 和田 健太郎, 2017, Kinematic Wave 理論の確率的な展開, 交通工学, Vol.52, No.4, 2017, pp. 39-44 [Kusakabe Takahiko, Wada Kentarou, 2017, Stochastic Extensions of Kinematic Wave Theory. Traffic Engineers, Vol.52, No.4, 2017, pp. 39-44]
- 2) Jabari, S. E., Zheng, J., Liu, H. X. (2014) A probabilistic stationary speed-density relation based on Newell's simplified car-following model. Transportation Research Part B: Methodological, 68, 205-223 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.06.006>
- 3) Newell, G. F. (2002) A simplified car-following theory: a lower order model. Transportation Research Part B: Methodological 36 (3), 195-205.
- 4) Levin, M. W., Boyles, S. D. (2016) A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 62, 103-116 <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.005>
- 5) Ghiasi, A., Hussain, O., Qian, Z.S., Li, X. (2017) A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: a Markov chain method. Transportation Research Part B: Methodological, 106, 266-292.
- 6) Zhou, J., Zhu, F. (2020) Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 115, 102614. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102614>
- 7) Zheng, F., Liu, C., Liu, X., Jabari, S. E., Lu, L. (2020) Analyzing the impact of automated vehicles on uncertainty and stability of the mixed traffic flow. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 112, 203-219. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.017>
- 8) Seo, T., Asakura, Y. (2017) Endogenous market penetration dynamics of automated and connected vehicles: Transport-oriented model and its paradox. Transportation Research Procedia, 27, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.tpro.2017.12.028>
- 9) Feller, W. (1950), An Introduction to Probability Theory and Its Applications, New York: Wiley.
- 10) Ben O. (2020) The Classical Occupancy Distribution: Computation and Approximation, The American Statistician, DOI: 10.1080/00031305.2019.1699445
- 11) Clark, S. D., Watling, D. P. (2005) Modelling network travel time reliability under stochastic demand. Transportation Research Part B, 39 (2), 119-140.
- 12) Lo, H.K., Chen, A. (2000) Traffic equilibrium problem with route-specific costs: Formulation and algorithms.

- Transportation Research Part B: Methodological, Vol.34, pp.493–513.
- 13) Fischer, A. (1992) A special Newton-type optimization method. *Optimization*, 24 (3–4), 269–284.
- 14) Sang Nguyen and Clermont Dupuis, 1984, An Efficient Method for Computing Traffic Equilibria in Networks with Asymmetric Transportation Costs, *Transportation Science*, vol. 18, pp.185-202.
- 15) G.M. Amaout and S. Bowling, 2014, A progressive deployment strategy for cooperative adaptive cruise control to improve traffic dynamics, *Int. J. Autom. Comput.*, 11 (1) (2014), pp. 10-18.
- (Received ?)
(Accepted ?)

The user equilibrium model for mixed flow of automated vehicles and human-driven vehicles by considering stochastic traffic capacity

Tatsuya ISHIKAWA, Teppei KATO, Rento ISA

The rapid spread of Automated Vehicles (AVs) is expected in the near future. During the transitional period, the driving environment will be a mixture of AVs and Human-driven Vehicles (HVs). For predicting the congestion distribution in such a AV-HV mixed environment, the User Equilibrium (UE) model that considers the characteristic of the mixed flow is necessary.

In this study, we propose a UE model that takes into account the uncertainty in traffic capacity introduced by different vehicle headway for different vehicle types. Numerical experiments using the proposed method are conducted to show the implications of the impact of AVs on the traffic conditions of the road network. The results show that creating AV-only lanes in parts of the city center to encourage shorter vehicle headways may have a positive impact on the network as a whole. On the other hand, it was shown that the improvement in traffic capacity due to the spread of AVs may lead to traffic concentration, which in turn may have a negative impact on the network as a whole.