

# 自動運転車両普及過程における 移動時間信頼性を考慮した マルチクラス交通量配分モデルの開発

新田 翔<sup>1</sup>・峪 龍一<sup>2</sup>・内田 賢悦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 北海道大学大学院工学院 工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

E-mail: n96sho1203@eis.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup> 学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

E-mail: ryuichitani@eis.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

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

近年、自動運転技術の発展に伴い、自動運転車両(以下 AV とする)の実社会への導入が期待されている。AV は道路インフラや他の車両との通信により、道路ネットワークの交通情報を得ることができる。そのため、人間が運転する車両(以下 HV とする)とは異なった経路選択行動をとると考えられ、AV の普及が進めば、道路ネットワークの交通状況が変化すると考えられる。

そこで本研究では、AV が普及する過程での道路ネットワークを対象とし、移動時間信頼性を考慮した交通量配分モデルの開発を行った。交通量配分モデルでは、AV の普及がリンク交通容量に与える影響を表現している。さらに、AV と HV では経路選択行動が異なると考えられるため、交通量配分モデルでは、経路選択行動の異質性も表現している。テストネットワークでの数値計算を行ったところ、AV の普及によって、交通状況が改善されることが示された。

**Key Words:** *Autonomous Vehicle, Travel Time Reliability, Multi-User-Class Traffic Assignment Model, Traffic Capacity*

## 1. はじめに

近年、自動運転技術は世界的に発展している。それに伴い、日本でも自動運転車両(以下 AV とする)の実用化に向けた動きが加速している。こうした背景から、AV が普及することによって、これまでと異なる交通状況が生起すると考えられる。

AV の普及による影響としては、交通容量の変化が挙げられる。AV は機械制御によって車間距離を取るため、人間が運転する車両(以下 HV とする)より効率的な運転挙動を示すと考えられる。また、AV は道路インフラなどとの通信によって、正確な交通情報をリアルタイムで得ることができると考えられる。そのため、HV と比較して、効率的な経路を選択することができると考えられる。本研究では、以上2つの影響を考慮し、AV と HV とが混在する道路ネットワークにおける交通状態の推計

モデルを開発する。このモデルでは、移動時間信頼性の観点から、交通需要と交通容量の不確実性が移動時間に与える影響を表現可能である。

既存研究では移動時間信頼性を表現するため、交通需要を確率変数として表現する交通量配分モデルがいくつか提案されてきた。その分布形状は様々であり、例えば、Nakayama and Takayama<sup>1)</sup> は二項分布に従う交通需要を提案した。Clark and Watling<sup>2)</sup> はポアソン分布に従う交通需要を提案した。また、Lam et al.<sup>3)</sup> は正規分布に従う交通需要を提案した。しかし、Uno et al.<sup>4)</sup> は観測によって交通需要が非対称な分布形状をもつ確率変数であることを指摘した。このことから、Zhou and Chen<sup>5)</sup>、Sumalee and Xu<sup>6)</sup> は各 OD ペアの交通需要が対数正規分布に従う交通量配分モデルを提案している。

また、AV と HV が道路ネットワーク上に混在する交通状況を考慮した交通量配分モデルが提案されている。

Zhang and Nie<sup>7)</sup>は HV は確率的利用者均衡配分原則 (SUE) に従い、自動運転車両は利用者均衡配分原則 (UE) に従うと仮定する交通量配分モデルを提案した。Bagloee et al.<sup>8)</sup>は HV は UE に従い、connected vehicle はシステム最適配分原則 (SO) に従って経路選択をすると仮定した交通量配分モデルを提案した。Tani and Uchida<sup>9)</sup>は自動運転車両と道路インフラが相互通信することによりシステム最適配分が実現するとして、時間信頼性を考慮した交通量配分モデルを提案した。また、Wang et al.<sup>10)</sup>は AV は UE に従い、HV は Cross Nested Logit モデルによって交通量配分を行うモデルを提案した。Seo and Asakura<sup>11)</sup>はネットワーク内のリンク交通量に対する AV 車両の比率によって交通容量が変動するモデルを提案した。

本研究では、Wang et al.<sup>10)</sup>と同様に、AV と HV では交通情報の獲得性に差異があることを踏まえ、AV は UE に従い、HV は SUE に従って経路選択を行うと考える。さらに、AV と HV の臨界車頭時間分布の違いを反映する確率的交通容量を導入した交通量配分モデルを開発する。

本研究の構成は以下の通りである。2 章では、提案するモデルの定式化を行う。3 章では、提案したモデルを検証するために行ったテストネットワークにおける数値計算の結果を示す。最後に、本稿をまとめ、今後の研究に関する展望と課題を示す。

## 2. モデルの定式化

### (1) 記号

本研究では、各種の交通量、移動時間は確率変数として表現されるが、それらは単に交通量あるいは移動時間として表記することにする。本稿で用いる記号を以下に示す。

$W$ :	OD ペア集合
$K_w$ :	OD ペア $w$ における経路集合
$A$ :	リンク集合
$Q$ :	ネットワーク内の総交通需要 (生成交通量)
$Q^z$ :	車両 $z \in \{hv, av\}$ の総交通需要 (添字 $hv, av$ はそれぞれ車両 HV, AV を表す)
$p_z$ :	総交通需要に対する車両 $z$ の比率
$Q_w^z$ :	OD ペア $w$ における車両 $z$ の交通需要
$p_w^z$ :	$Q^z$ に対する $Q_w^z$ の比率
$F_{w,k}^z$ :	OD ペア $w$ における経路 $k$ 上の車両 $z$ 交通量
$p_{w,k}^z$ :	車両 $z$ が OD ペア $w$ において経路 $k$ を選択する確率
$V_a^z$ :	リンク $a$ 上の車両 $z$ 交通量
$\delta_{w,k,a}$ :	リンク $a$ が OD ペア $w$ における経路 $k$ を構成するときに 1 を、それ以外るときに 0 をとる

変数

$V_a$ :	リンク交通量
$h_0$ :	基準臨界車頭時間
$R_z$ :	$h_0$ に対する車両 $z$ の臨界車頭時間の比率
$p_{av,a}$ :	リンク交通量に対する AV 車両の比率
$R_a$ :	$h_0$ に対するリンク交通量 $V_a$ の臨界車頭時間の比率
$H_a$ :	リンク $a$ の臨界車頭時間
$C_a$ :	リンク $a$ の交通容量
$T_a$ :	リンク $a$ の移動時間
$t_a^0$ :	リンク $a$ の自由流走行時間
$\alpha_a, \beta_a$ :	BPR 関数のパラメータ
$T'_a$ :	リンク $a$ における混雑による遅れ時間
$PT_{w,k}$ :	OD ペア $w$ における経路 $k$ の移動時間
$c_{w,k}$ :	OD ペア $w$ における経路 $k$ の移動コスト
$TT_a$ :	リンク $a$ の総移動時間
$g_{w,k}^{hv}$ :	OD ペア $w$ における経路 $k$ の一般化費用

### (2) 交通流の定式化

本研究ではネットワーク全体での総交通需要  $Q$  を対数正規分布に従う確率変数として表現する。

$$Q \sim LN(\mu_Q, \sigma_Q^2) \quad (1)$$

以下、対数正規分布  $LN(\mu_X, \sigma_X^2)$  に従う確率変数  $X$  の平均  $E[X]$ 、分散  $Var[X]$  はそれぞれ  $\exp(\mu_X + \sigma_X^2/2)$ 、 $\exp(2\mu_X + \sigma_X^2) \cdot (\exp(\sigma_X^2) - 1)$  と計算されることに注意されたい。

車両  $z \in \{hv, av\}$  の交通需要  $Q^z$  は、その比率  $p_z$  と総交通需要  $Q$  として計算される。

$$Q^z = p_z \cdot Q \quad \forall z \in \{hv, av\} \quad (2)$$

同様に、OD ペア  $w$  における車両  $z$  の交通需要  $Q_w^z$  は、 $p_w^z$  と  $Q^z$  との積となり、(3) 式で表せる。

$$Q_w^z = p_w^z \cdot Q^z \quad \forall w \in W \quad (3)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\sum_{w \in W} p_w^z = 1 \quad (4)$$

各車両の経路交通量  $F_{w,k}^z$  は、車両  $z$  の経路選択確率  $p_{w,k}^z$  と各車両の交通需要  $Q_w^z$  との積となり、(5) 式で表せる。

$$F_{w,k}^z = p_{w,k}^z \cdot Q_w^z = p_{w,k}^z \cdot p_w^z \cdot p_z \cdot Q \quad \forall k \in K_w \quad (5)$$

各車両のリンク交通量  $V_a^z$  は、リンク  $a$  を通るすべての経路交通量の和であり、(6) 式で表せる。

$$\begin{aligned} V_a^z &= \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,a} \cdot F_{w,k}^z \\ &= \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,a} \cdot p_{w,k}^z \cdot Q_w^z \\ &= \hat{p}_a^z \cdot Q \quad \forall a \in A \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\hat{p}_a^z = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,a} \cdot p_{w,k}^z \cdot p_w^z \cdot p_z \quad (7)$$

リンク交通量 $V_a$ は各車両のリンク交通量 $V_a^z$ の和となり、(8)式で表せる。

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{hv} + V_a^{av} \\ &= \hat{p}_a^{hv} \cdot Q + \hat{p}_a^{av} \cdot Q \\ &= \hat{p}_a \cdot Q \quad \forall a \in A \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\hat{p}_a = \hat{p}_a^{hv} + \hat{p}_a^{av} \quad (9)$$

このとき、リンク $a$ を通る交通量 $V_a$ は、総交通需要 $Q$ の $\hat{p}_a$ 倍として表わされるため、(10)式に示す対数正規分布に従う。

$$V_a \sim LN(\mu_{V_a}, \sigma_{V_a}^2) \quad (10)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{V_a} = \mu_Q + \ln(\hat{p}_a) \quad (10a)$$

$$\sigma_{V_a}^2 = \sigma_Q^2 \quad (10b)$$

### (3) リンク交通容量の定式化

リンク交通容量はその定義から、単位時間あたりの臨界車頭時間の逆数として算出される。本研究では、AVとHVが混在するリンク $a$ の臨界車頭時間 $H_a$ は、 $h_0$ に対する混合交通流 $V_a$ の臨界車頭時間の比率 $R_a$ と基準車頭時間 $h_0$ との積として定める。

本研究では、AVとHVの混合流の臨界車頭時間は、2期間で異なる金利が適用される場合の複利年利率の計算方法を適用し計算できると考える。たとえば、預金を年金利 $r_1$ で $y_1$ 年間運用し、その後、年金利 $r_2$ で $y_2$ 年間運用したときの複利年利率 $r$ は、それぞれの金利下での運用期間を重みとする $1+r_1$ と $1+r_2$ の加重幾何平均として計算され、(11)式で与えられる。

$$1+r = (1+r_1)^{y_1/(y_1+y_2)} \cdot (1+r_2)^{y_2/(y_1+y_2)} \quad (11)$$

(11)式において、 $1+r$ 、 $1+r_1$ 、 $1+r_2$ それぞれが $R_a$ 、 $R_{av}$ 、 $R_{hv}$ に対応すると考えると、 $R_{av}$ 、 $R_{hv}$ の重みはそれぞれ $p_{av,a}$ 、 $1-p_{av,a}$ となるため、 $R_a$ は(12)式に表せる。

$$R_a = R_{av}^{p_{av,a}} \cdot R_{hv}^{1-p_{av,a}} \quad (12)$$

ここで、リンク $a$ でのAVの比率は(13)式に表せる。

$$p_{av,a} = \frac{V_a^{av}}{V_a} = \frac{\hat{p}_a^{av}}{\hat{p}_a} \quad (13)$$

ここで、 $h_0$ に対する車両 $z$ の臨界車頭時間の比率が(14)に示す対数正規分布：

$$R_z \sim LN(\mu_{R_z}, \sigma_{R_z}^2) \quad (14)$$

に従う場合、 $R_a$ は(15)式に示す対数正規分布に従う。

$$R_a \sim LN(\mu_{R_a}, \sigma_{R_a}^2) \quad (15)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{R_a} = p_{av,a} \cdot \mu_{R_{av}} + (1-p_{av,a}) \cdot \mu_{R_{hv}} \quad (15a)$$

$$\sigma_{R_a}^2 = p_{av,a}^2 \cdot \sigma_{R_{av}}^2 + (1-p_{av,a})^2 \cdot \sigma_{R_{hv}}^2 \quad (15b)$$

したがって、リンク $a$ における臨界車頭時間は基準車頭時間と $R_a$ との積として、(16)式に表せる。

$$H_a = h_0 \cdot R_a \quad (16)$$

時間交通容量は、その定義から(17)式に表せる。

$$C_a = \frac{3600}{H_a} = \frac{3600}{h_0 \cdot R_a} \quad (17)$$

(15)、(17)式からリンク交通容量は(18)式に示す対数正規分布に従う。

$$C_a \sim LN(\mu_{C_a}, \sigma_{C_a}^2) \quad (18)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{C_a} = \ln(3600) - \ln(h_0) - \mu_{R_a} \quad (18a)$$

$$\sigma_{C_a}^2 = \sigma_{R_a}^2 \quad (18b)$$

### (4) 移動時間の定式化

本研究におけるリンク移動時間は、(19)式に示すBPR関数によって算出する。

$$T_a(V_a^{hv}, V_a^{av}) = t_a^0 \cdot \left(1 + \alpha_a \cdot \left(\frac{V_a}{C_a}\right)^{\beta_a}\right) \quad (19)$$

ここで、(19)式に(8)、(17)式を代入すると、(20)式を得る。

$$T_a = t_a^0 + t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot \left(\frac{\hat{p}_a \cdot Q \cdot H_a}{3600}\right)^{\beta_a} \quad (20)$$

(20)式は、自由流移動時間を表す第1項と、リンクの混雑による遅れ時間を表す第2項とに分離できることを示している。以下、第2項をリンク遅れ時間と表現し、 $T'_a$ で表す。(20)式よりリンク遅れ時間は(21)式に表せる。

$$T'_a = t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot \left(\frac{\hat{p}_a \cdot Q \cdot H_a}{3600}\right)^{\beta_a} \quad (21)$$

(21)式両辺の自然対数をとると、(22)式を得る。

$$\ln(T'_a) = \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) + \beta_a \cdot \{\ln(\hat{p}_a) + \ln(Q) + \ln(H_a) - \ln(3600)\} \quad (22)$$

(22)式において、 $\ln(T'_a)$ が正規分布に従うため、 $T'_a$ は(23)式に示す対数正規分布に従う。

$$T'_a \sim LN(\mu_{T'_a}, \sigma_{T'_a}^2) \quad (23)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \mu_{T'_a} &= \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) \\ &+ \beta_a \cdot \{\mu_Q + \mu_{R_a} + \ln(\hat{p}_a) + \ln(h_0) - \ln(3600)\} \end{aligned} \quad (23a)$$

$$\sigma_{T'_a}^2 = (\beta_a)^2 \cdot (\sigma_Q^2 + \sigma_{R_a}^2) \quad (23b)$$

結果として、リンク移動時間は自由流移動時間の分だけシフトした対数正規分布に従う。よって、移動時間の平均、分散と2つの異なるリンクにおける移動時間に関する共分散はそれぞれ(24)、(25)、(26)式に表せる。

$$\begin{aligned} E[T_a] &= t_a^0 + E[T'_a] \\ &= t_a^0 + \exp\left(\mu_{T'_a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{T'_a}^2\right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[T_a] &= \text{Var}[T'_a] \\ &= \exp\left(2\mu_{T'_a} + \sigma_{T'_a}^2\right) \left(\exp\left(\sigma_{T'_a}^2\right) - 1\right) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[T_a, T_b] &= \text{Cov}[T'_a, T'_b] \\ &= \exp\left(\mu_{T'_a, T'_b} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{T'_a, T'_b}^2\right) \\ &\quad - \exp\left(\mu_{T'_a} + \mu_{T'_b} + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{T'_a}^2 + \sigma_{T'_b}^2)\right) \quad \forall a, b \in A \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \mu_{T'_a, T'_b} &= \ln(\alpha_a) + \ln(\alpha_b) + \ln(t_a^0) + \ln(t_b^0) \\ &\quad + \beta_a \cdot \ln(\hat{p}_a) + \beta_b \cdot \ln(\hat{p}_b) + (\beta_a + \beta_b) \cdot \mu_Q \\ &\quad - \beta_a \cdot \mu_{c_a} - \beta_b \cdot \mu_{c_b} \end{aligned} \quad (26a)$$

$$\sigma_{T'_a, T'_b}^2 = (\beta_a + \beta_b)^2 \cdot \sigma_Q^2 + \beta_a^2 \cdot \sigma_{c_a}^2 + \beta_b^2 \cdot \sigma_{c_b}^2 \quad (26b)$$

経路移動時間は、その経路を構成するリンクの移動時間の合計であり、(27)式で表せる。

$$PT_{w,k} = \sum_{a \in A} T_a \cdot \delta_{w,k,a} \quad \forall w \in W, \forall k \in K_w \quad (27)$$

(27)式より、経路移動時間の平均と分散はそれぞれ(28)、(29)式に表せる。

$$E[PT_{w,k}] = \sum_{a \in A} E[T_a] \cdot \delta_{w,k,a} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[PT_{w,k}] &= \sum_{a \in A} \text{Var}[T_a] \cdot \delta_{w,k,a} \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b(\neq a) \in A} \delta_{w,k,a} \cdot \delta_{w,k,b} \cdot \text{Cov}[T_a, T_b] \end{aligned} \quad (29)$$

本研究では、移動時間の不確実性を考慮したリスク回避的な経路選択を想定するため、経路コストを(30)式に定める。

$$c_{w,k} = E[PT_{w,k}] + \gamma \cdot \sqrt{\text{Var}[PT_{w,k}]} \quad (30)$$

$$\forall w \in W, \forall k \in K_w$$

ここで、経路コストにおける分散項の係数 $\gamma$ は正の値をとる。

リンク $a$ を利用するドライバーが経験する総移動時間はリンク $a$ における交通量と移動時間との積であり、(31)式に表せる。

$$TT_a = V_a \cdot T_a = V_a \cdot t_a^0 + V_a \cdot T'_a \quad (31)$$

(31)式より、リンク $a$ の総移動時間の平均と分散はそれぞれ(32)、(33)式に表せる。

$$\begin{aligned} E[TT_a] &= E[V_a \cdot T_a] = t_a^0 \cdot E[V_a] + E[V_a \cdot T'_a] \quad (32) \\ \text{Var}[TT_a] &= \text{Var}[V_a \cdot T_a] \\ &= (t_a^0)^2 \cdot \text{Var}[V_a] + \text{Var}[V_a \cdot T'_a] \\ &\quad + 2 \cdot t_a^0 \cdot \text{Cov}[V_a, V_a \cdot T'_a] \end{aligned} \quad (33)$$

なお、 $E[V_a \cdot T'_a]$ 、 $\text{Var}[V_a \cdot T'_a]$ と $\text{Cov}[V_a, V_a \cdot T'_a]$ の導出過程は付録Aに示す。ネットワーク内にいるすべてのドライバーが経験する総移動時間はリンクの総移動時間の合計であり、(34)式に表せる。

$$TT = \sum_{a \in A} TT_a \quad (34)$$

(34)式より、ネットワークの総移動時間の平均と分散はそれぞれ(35)、(36)式に表せる。

$$E[TT] = E\left[\sum_{a \in A} TT_a\right] = \sum_{a \in A} E[TT_a] \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[TT] &= \sum_{a \in A} \text{Var}[TT_a] \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b(\neq a) \in A} \text{Cov}[TT_a, TT_b] \end{aligned} \quad (36)$$

なお、 $\text{Cov}[TT_a, TT_b]$ の導出過程は付録Bに示す。

#### (4) 交通量配分問題の定式化

本研究では、同一の道路ネットワーク上にHVとAVが混在する状態を考えている。ここでは、HVとAVは互いに異なる経路選択行動をとるものとし、それらの経路選択問題はマルチユーザクラス型の交通量配分問題として表現する。HVのドライバーの経路選択は、logit型の確率的利用者均衡(SUE)条件によって表現する。Wang et al. (2019)と同様に、HVに関する一般化経路費用を(37)式に定める。

$$g_{w,k}^{hv} = c_{w,k} + \frac{1}{\theta} \cdot \ln\left(\frac{f_{w,k}^{hv}}{q_w^{hv}}\right) \quad (37)$$

ここで、 $f_{w,k}^{hv}$ 、 $q_w^{hv}$ はそれぞれ $E[F_{w,k}^{hv}]$ 、 $E[Q_w^{hv}]$ を表す。また、 $\theta$ は正の値をとるロジットモデルの分散パラメータであり、その値が大きいほど、HVは確度の高い経路情報をもとに経路選択を行うことができる。あるODペアにおけるSUE配分の均衡条件は、利用される経路の一般化コストはすべて等しく、利用されていない経路のコストより小さいかせいぜい等しくなることである。この均衡条件を踏まえると、HVに関する均衡条件は変分不等式問題として(38)式に表せる。

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} g_{w,k}^{hv} \cdot (f_{w,k}^{hv} - f_{w,k}^{hv*}) \geq 0 \quad (38)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^{hv} = q_w^{hv} \quad (39)$$

$$f_{w,k}^{hv} \geq 0 \quad (40)$$

ここで、 $f_{w,k}^{hv*}$ は均衡状態における $f_{w,k}^{hv}$ を表す。

一方、AVの経路選択は、利用者均衡(UE)条件によって表現する。それは変分不等式問題として(41)式に表せる。

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} c_{w,k} \cdot (f_{w,k}^{av} - f_{w,k}^{av*}) \geq 0 \quad (41)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^{av} = q_w^{av} \quad (42)$$

$$f_{w,k}^{av} \geq 0 \quad (43)$$

(38)式から(43)式より、HV と AV が混在するネットワークにおける交通量配分問題は、変分不等式問題として(44)式に表せる。

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} g_{w,k}^{hv} \cdot (f_{w,k}^{hv} - f_{w,k}^{hv*}) + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} c_{w,k} \cdot (f_{w,k}^{av} - f_{w,k}^{av*}) \geq 0 \quad (44)$$

ただし、制約条件は(39)、(40)、(42)、(43)式である。

### 3. 数値計算

#### (1) 交通容量に関する数値的分析

(17)式に提案した交通容量のモデルについて、あるリンクにおける交通量に対する AV 車両比率の変化に伴う交通容量の変動を数値的に検証を行う。本研究では、AV が交通状態の向上に寄与するものであるとして、AV の臨界車頭時間は HV より短いものとする。すなわち、臨界車頭時間の伸び率の平均に同様の関係があるとする。また、臨界車頭時間の伸び率の分散についても AV は機能設定によって任意の値に定められるとして、同様の傾向があるとする。そのため、この計算では AV に関する臨界車頭時間の伸び率  $R_{av}$  が確率的に変動する場合 ( $Var[R_{av}] > 0$ ) と、設定によって一定の値である場合 ( $Var[R_{av}] = 0$ ) の 2 つの場合を考える。

この計算において、基準車頭時間  $h_0$  は 2.0 [sec]、HV に関する臨界車頭時間の伸び率の平均  $E[R_{hv}]$  と分散  $Var[R_{hv}]$  はそれぞれ 1.15、 $5.0 \times 10^{-2}$  と設定した。このとき  $R_{hv}$  の分布パラメータはそれぞれ  $\mu_{R_{hv}} = 0.12$ 、 $\sigma_{R_{hv}} = 3.7 \times 10^{-2}$  である。

##### a) $R_{av}$ が確率的に変動する場合

本項では  $R_{av}$  が確率的に変動する場合、リンク交通量に対する AV 車両の比率の変化に伴う交通容量の挙動を分析する。AV に関する臨界車頭時間の伸び率の平均  $E[R_{av}]$  と分散  $Var[R_{av}]$  はそれぞれ 0.85、 $5.0 \times 10^{-3}$  と定めた。このとき  $R_{av}$  の分布パラメータはそれぞれ  $\mu_{R_{av}} = -0.17$ 、 $\sigma_{R_{av}}^2 = 6.9 \times 10^{-3}$  である。交通容量の平均、変動係数の挙動をそれぞれ図-1、2 に表す。また、図-1 において、実線は交通容量の平均  $E[C_a]$  を表し、点線は平均に標準偏差を加減算した値  $E[C_a] \pm SD[C_a]$  を表す。以下の結果より、リンク交通量に対する AV 車両の比率の増加によって交通容量の平均は向上することが確認された。また、変動係数はリンク交通量に対する AV 車両の比率の増加に伴い減少する傾向があることが示された。なお、この計算において交通容量の変動係数はリンク交通量に対する AV 車両の比率がおおよそ 85% の点で最小となっている。(12)式に定めたモデルの特性上、AV に関

する車頭時間の伸び率  $R_{av}$  が確率変数である場合、交通容量の変動係数  $CV[C_a]$  が最小となるリンク交通量に対する AV 車両の比率  $p_{av,a} \in (0, 1)$  が存在する。なお、このことの証明は付録 C に示す。

##### b) $R_{av}$ が定数である場合

本項では  $R_{av}$  が確定的な値である場合、すなわち分散  $Var[R_{av}] = 0$  となる場合について、リンク交通量に対する AV 車両の比率の変化に伴う交通容量の挙動を分析する。なお、 $R_{av}$  の平均  $E[R_{av}]$  は 0.85 と定めた。このとき  $R_{av}$  の分布パラメータはそれぞれ  $\mu_{R_{av}} = -0.16$ 、 $\sigma_{R_{av}}^2 = 0$  である。交通容量の平均、変動係数の挙動をそれぞれ図-3, 4 に表す。以下の結果より、前項と同様にリンク交通量に対する AV 車両の比率の増加によって交通容量の平均は向上することが確認された。また、変動係数はリンク交通量に対する AV 車両の比率の増加に伴い単調に減少することが示された。

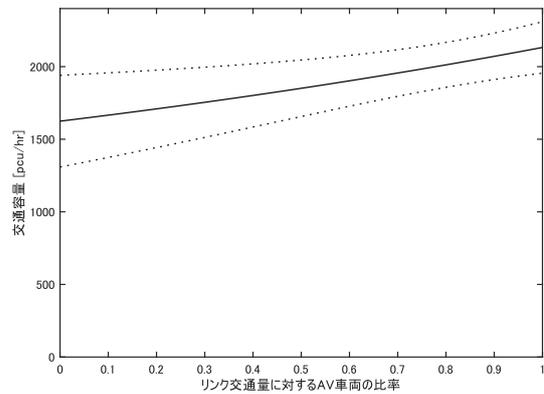


図-1 平均交通容量の推移 ( $R_{av}$  が確率変数,  $\sigma_{R_{av}}^2 = 6.9 \times 10^{-3}$ )

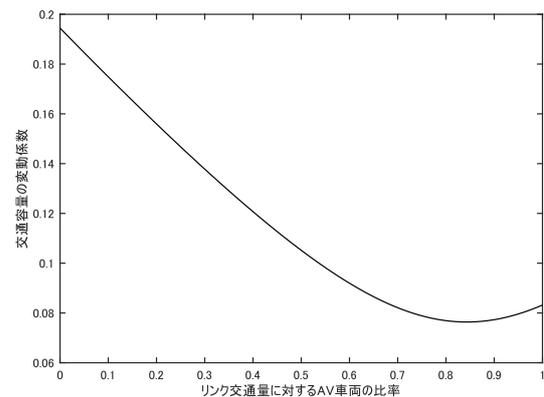


図-2 交通容量の変動係数の推移 ( $R_{av}$  が確率変数,  $\sigma_{R_{av}}^2 = 6.9 \times 10^{-3}$ )

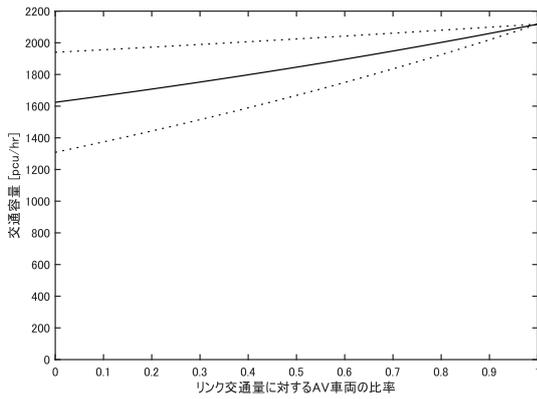


図-3 平均交通容量の推移 ( $R_{av}$ が定数,  $\sigma_{R_{av}}^2 = 0$ )

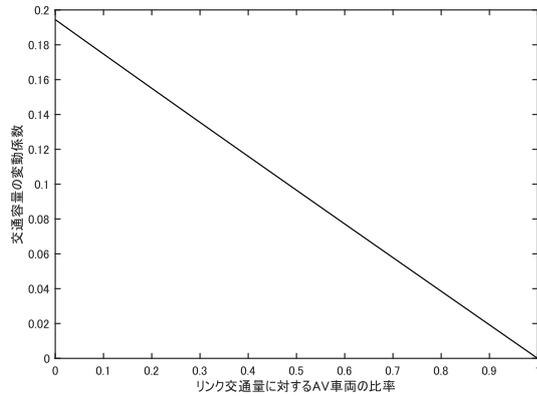


図-4 交通容量の変動係数の推移 ( $R_{av}$ が定数,  $\sigma_{R_{av}}^2 = 0$ )

(2) 総移動時間の変化

本節では総交通需要に対する AV 車両の比率と AV の臨界車頭時間の変化に伴う総移動時間の変化を分析する。ここでは、4つの OD ペア、13 のノードと 19 のリンクから構成されるテストネットワーク (Nguyen and Dupuis<sup>12)</sup>) を用いて数値計算を行った。このテストネットワークを図-5 に表す。なお、OD ペアはノード 1 から 2、1 から 3、4 から 2、4 から 3 の 4 つである。このテストネットワークにおけるすべてのリンクの自由流移動時間は 5 [min] とする。BPR 関数のパラメータはすべてのリンクに関して同一であるとして、 $\alpha_a$  と  $\beta_a$  をそれぞれ 0.15、4 と定める。総交通需要の平均と変動係数はそれぞれ 20,000 [pcu], 0.1 と与えた。また、各車両に関する OD 交通量の配分率はすべての OD ペアに対して 0.25 とする。また、(30)式中の分散項係数  $\gamma$  は 1.0 と定める。HV 車両に関する臨界車頭時間の伸び率  $R_{hv}$  は、前項と同様に平均  $E[R_{hv}]$  と分散  $Var[R_{hv}]$  をそれぞれ 1.15、 $5.0 \times 10^2$  と設定した。

総交通需要に対する AV 車両の比率  $p_{av}$  と、AV 車両に関する臨界車頭時間の伸び率の期待値  $E[R_{av}]$  が変化するときの、総移動時間  $TT$  の平均  $E[TT]$  と標準偏差

$SD[TT] = \sqrt{Var[TT]}$  の変化を分析する。なお、 $p_{av}$  は 0 から 1 の範囲で、 $E[R_{av}]$  は 0.6 から 1.1 の範囲で変化するとして計算する。ただし、AV に関する臨界車頭時間の伸び率の分散  $Var[R_{av}]$  は 0 とする。加えて、ネットワーク上のすべてのドライバーが経験する総コスト (総不効用) を  $E[TT] + SD[TT]$  と定め、同様の分析を行う。これらの分析は SUE 配分において異なる分散パラメータ  $\theta$  を設定して行った。これは、HV が取得するネットワーク上の経路情報の精度の違いが交通状態に与える影響をみるために設定したものである。 $\theta$  が 1 の場合における総移動時間  $TT$  の平均  $E[TT]$ 、標準偏差  $SD[TT]$  に関する数値計算の結果をそれぞれ図-6、7 に示す。また、総不効用  $E[TT] + SD[TT]$  に関する数値計算の結果を図-8 に示す。 $E[R_{av}]$  を 0.85 に固定し、 $\theta$  を 0.001 から 1 まで変化させた場合の  $p_{av}$  に対する総移動時間の平均の関係を図-9 に示す。標準偏差と総不効用に関する同様の関係をそれぞれ図-10、11 に示す。

図-6 に示した結果から、総交通需要に対する AV 車両の比率  $p_{av}$  が増加するにしたがって、総移動時間の平均は減少する傾向が示された。また、基準臨界車頭時間に対する AV 車両の臨界車頭時間の比率  $E[R_{av}]$  が減少するにしたがって、総移動時間の平均は減少する傾向が示された。また、図-7、8 の結果から、総移動時間の標準偏差、総不効用に関しても、同様の傾向があることが確認された。加えて、図-9 に示した結果から  $\theta$  の値が大きいほど、総移動時間の平均が小さくなることが示された。図-10、11 の結果から、総移動時間の標準偏差、総不効用に関しても、同様の傾向があることが確認された。以上の結果から、AV の普及率が上がるほど、また HV の経路情報の確度が高まる ( $\theta$  が大きくなる) ほど、ネットワーク内の交通状態が改善されることが示された。

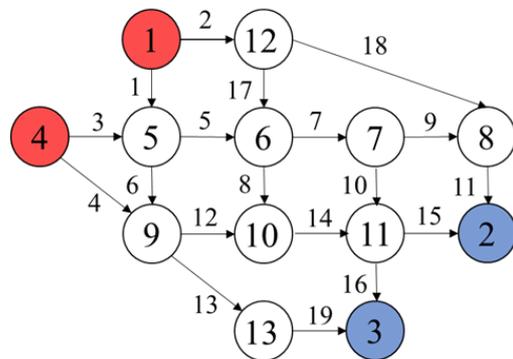


図-5 テストネットワーク

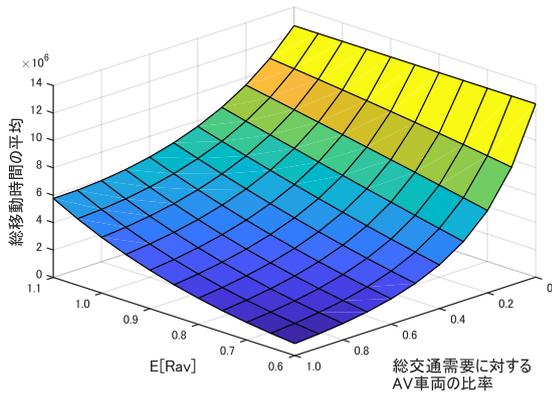


図-6 総移動時間の平均 ( $\theta = 1.0$ )

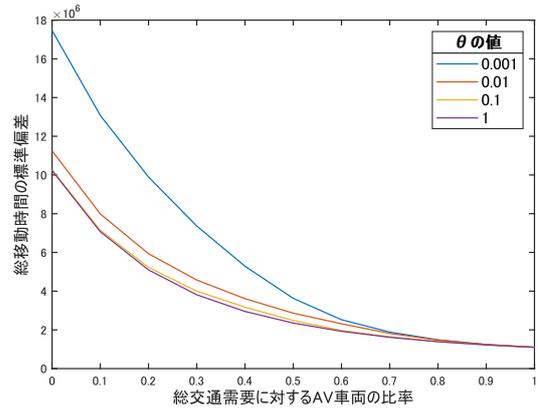


図-10 総移動時間の標準偏差 ( $E[R_{av}] = 0.85$ )

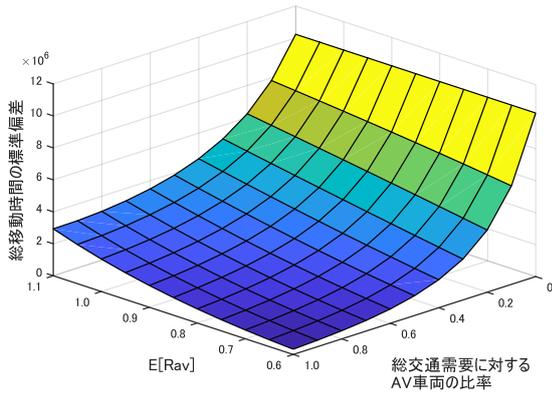


図-7 総移動時間の標準偏差 ( $\theta = 1.0$ )

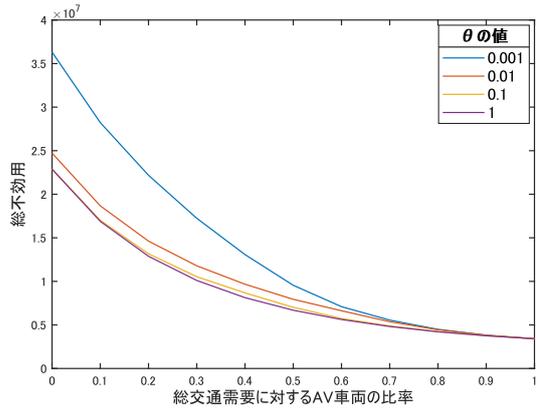


図-11 総不効用 ( $E[R_{av}] = 0.85$ )

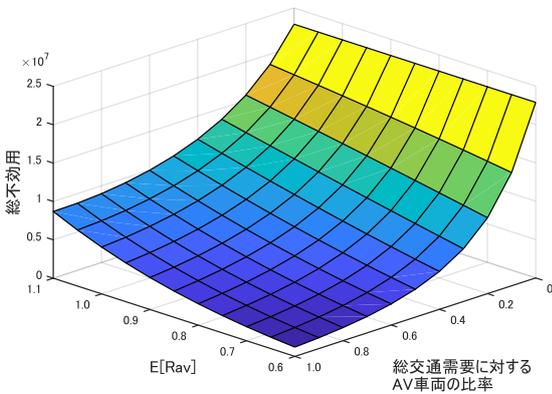


図-8 総不効用の推移 ( $\theta = 1.0$ )

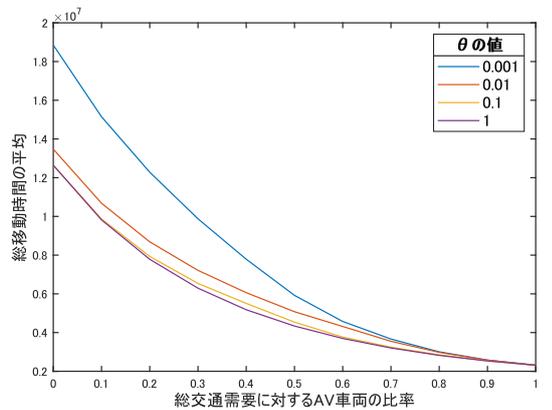


図-9 総移動時間の平均 ( $E[R_{av}] = 0.85$ )

#### 4. まとめ

本研究では、AV と HV が道路ネットワーク上で混在する状況を想定し、移動時間の不確実性を考慮したマルチクラスの交通量配分モデルを提案した。総交通需要が対数正規分布に従うと仮定し、ネットワークにおける移動時間の不確実性を表現した。また、AV の普及による交通容量の変動を考慮するため、AV/HV の臨界車頭時間から交通容量を推計するモデルを交通量配分モデルに導入した。経路選択に関しては、AV は UE、HV は SUE に従うと仮定し、変分不等式問題として交通量配分問題を定式化した。さらに、提案したモデルの検証のため、テストネットワークにおける数値計算を行った。

本研究では、AV と HV で異なる経路選択行動をとると仮定したが、先行研究で提案された交通量配分モデルは様々な経路選択原則を採用しており、各車両の経路選択原則に関する見解は統一されていない。そのため、それぞれのモデルに関して妥当性を検証するため、比較検討を行う必要があると考えられるが、これは今後の課題としたい。

謝辞：

本研究は JSPS 科研費 JPK18H01550 の助成を受けたものです。

#### 付録 A $E[V_a \cdot T'_a]$ , $Var[V_a \cdot T'_a]$ , $Cov[V_a, V_a \cdot T'_a]$ の導出

リンク交通量  $V_a$  とリンク遅れ時間  $T'_a$  との積は (A1) 式に表せる。

$$\begin{aligned} V_a \cdot T'_a &= V_a \cdot t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot \left(\frac{V_a}{C_a}\right)^{\beta_a} \\ &= t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot V_a^{\beta_a+1} \cdot C_a^{-\beta_a} \end{aligned} \quad (A1)$$

$V_a$  と  $T'_a$  はともに対数正規分布に従うため、再生性からその積もまた対数正規分布に従う。よって、積  $V_a \cdot T'_a$  は (A2) 式に示す対数正規分布に従う。

$$V_a \cdot T'_a \sim LN\left(\mu_{V_a \cdot T'_a}, \sigma_{V_a \cdot T'_a}^2\right) \quad (A2)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \mu_{V_a \cdot T'_a} &= \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) \\ &\quad + (\beta_a + 1) \cdot \mu_{V_a} - \beta_a \cdot \mu_{C_a} \end{aligned} \quad (A2a)$$

$$\sigma_{V_a \cdot T'_a}^2 = (\beta_a + 1)^2 \cdot \sigma_{V_a}^2 + (\beta_a)^2 \cdot \sigma_{C_a}^2 \quad (A2b)$$

したがって、 $V_a \cdot T'_a$  の平均と分散は (A3), (A4) 式に表せる。

$$E[V_a \cdot T'_a] = \exp\left(\mu_{V_a \cdot T'_a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{V_a \cdot T'_a}^2\right) \quad (A3)$$

$$Var[V_a \cdot T'_a] = (E[V_a \cdot T'_a])^2 \cdot \left\{ \exp\left(\sigma_{V_a \cdot T'_a}^2\right) - 1 \right\} \quad (A4)$$

次に、 $V_a$  と  $V_a \cdot T'_a$  の共分散を求める。共分散の定義から、 $Cov[V_a, V_a \cdot T'_a]$  は (A5) 式に表せる。

$$\begin{aligned} Cov[V_a, V_a \cdot T'_a] &= E[V_a \cdot (V_a \cdot T'_a)] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T'_a] \\ &= E[V_a^2 \cdot T'_a] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T'_a] \\ &= E[D_a] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T'_a] \end{aligned} \quad (A5)$$

このとき、 $V_a^2 \cdot T'_a = D_a$  とおくと、(A2) 式と同様の議論より、 $D_a$  も以下に示す対数正規分布に従う。

$$D_a \sim LN(\mu_{D_a}, \sigma_{D_a}^2) \quad (A6)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{D_a} = \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) + (\beta_a + 2) \cdot \mu_{V_a} - \beta_a \cdot \mu_{C_a} \quad (A6a)$$

$$\sigma_{D_a}^2 = (\beta_a + 1)^2 \cdot \sigma_{V_a}^2 + (\beta_a)^2 \cdot \sigma_{C_a}^2 \quad (A6b)$$

#### 付録 B $Cov[TT_a, TT_b]$ の導出

異なる 2 つのリンクにおける総移動時間の共分散  $Cov[TT_a, TT_b]$  は (B1) 式に表せる。

$$Cov[TT_a, TT_b] = E[TT_a \cdot TT_b] - E[TT_a] \cdot E[TT_b] \quad (B1)$$

ここで、右辺の第 1 項を展開すると、(B2) 式を得る。

$$\begin{aligned} E[TT_a \cdot TT_b] \\ &= E[(t_a^0 \cdot V_a + V_a \cdot T'_a) \cdot (t_b^0 \cdot V_b + V_b \cdot T'_b)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (t_b^0 \cdot V_b)] + E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T'_b)] \\ &\quad + E[(t_b^0 \cdot V_b) \cdot (V_a \cdot T'_a)] + E[(V_a \cdot T'_a) \cdot (V_b \cdot T'_b)] \end{aligned} \quad (B2)$$

(B2) 式における右辺の各項はそれぞれ (B3) から (B6) 式として求められる。

$$\begin{aligned} E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (t_b^0 \cdot V_b)] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot E[V_a \cdot V_b] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b \cdot E[Q^2] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b \cdot \exp(2\mu_Q + 2\sigma_Q^2) \end{aligned} \quad (B3)$$

$$\begin{aligned} E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T'_b)] \\ &= t_a^0 \cdot E[V_a \cdot V_b \cdot T'_b] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b \cdot E[Q^{\beta_b+2}] \cdot E[C_b^{-\beta_b}] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b^{\beta_b+1} \\ &\quad \cdot \exp\left((\beta_b + 2) \cdot \mu_Q + \frac{1}{2}(\beta_b + 2)^2 \cdot \sigma_Q^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\beta_b \cdot \mu_{C_b} + \frac{1}{2}\beta_b^2 \cdot \sigma_{C_b}^2\right) \end{aligned} \quad (B4)$$

$$\begin{aligned} E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T'_b)] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \hat{p}_a^{\beta_a+1} \cdot \hat{p}_b \\ &\quad \cdot \exp\left((\beta_a + 2) \cdot \mu_Q + \frac{1}{2}(\beta_a + 2)^2 \cdot \sigma_Q^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\beta_a \cdot \mu_{C_a} + \frac{1}{2}\beta_a^2 \cdot \sigma_{C_a}^2\right) \end{aligned} \quad (B5)$$

$$\begin{aligned} E[(V_a \cdot T'_a) \cdot (V_b \cdot T'_b)] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot \hat{p}_a^{\beta_a+1} \cdot \hat{p}_b^{\beta_b+1} \\ &\quad \cdot E[Q^{\beta_a+\beta_b+2}] \cdot E[C_a^{-\beta_a}] \cdot E[C_b^{-\beta_b}] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot \hat{p}_a^{\beta_a+1} \cdot \hat{p}_b^{\beta_b+1} \\ &\quad \cdot \exp\left((\beta_a + \beta_b + 2) \cdot \mu_Q + \frac{1}{2}(\beta_a + \beta_b + 2)^2 \cdot \sigma_Q^2\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\beta_a \cdot \mu_{C_a} - \beta_b \cdot \mu_{C_b} + \frac{1}{2}(\beta_a^2 \cdot \sigma_{C_a}^2 + \beta_b^2 \cdot \sigma_{C_b}^2)\right) \end{aligned} \quad (B6)$$

#### 付録 C 交通容量の変動係数 $CV[C_a]$ に関する証明

確率変数の変動係数はその標準偏差と平均との比として定められる。ゆえに交通容量の変動係数  $CV[C_a]$  は (C1) 式に表せる。

$$CV[C_a] = \frac{SD[C_a]}{E[C_a]} \quad (C1)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} SD[C_a] &= \sqrt{Var[C_a]} \\ &= E[C_a] \cdot \sqrt{\exp(\sigma_{C_a}^2) - 1} \end{aligned} \quad (C2)$$

(C2) 式を (C1) 式に代入すると, (C3) 式を得る.

$$\begin{aligned} CV[C_a] &= \sqrt{\exp(\sigma_{C_a}^2) - 1} \\ &= \sqrt{\exp(\sigma_{R_a}^2) - 1} \\ &= \sqrt{\exp(p_{av,a}^2 \cdot \sigma_{R_{av}}^2 + (1 - p_{av,a})^2 \cdot \sigma_{R_{hv}}^2) - 1} \end{aligned} \quad (C3)$$

よって,  $CV[C_a]$  の  $p_{av,a}$  に関する偏導関数は (C4) 式に表せる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial CV[C_a]}{\partial p_{av,a}} &= \left( \exp \left( p_{av,a}^2 \cdot \sigma_{R_{av}}^2 + (1 - p_{av,a})^2 \cdot \sigma_{R_{hv}}^2 \right) - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\quad \cdot \exp \left( p_{av,a}^2 \cdot \sigma_{R_{av}}^2 + (1 - p_{av,a})^2 \cdot \sigma_{R_{hv}}^2 \right) \\ &\quad \cdot 2(p_{av,a} \cdot \sigma_{R_{av}}^2 - (1 - p_{av,a}) \cdot \sigma_{R_{hv}}^2) \end{aligned} \quad (C4)$$

(C4) 式において,  $p_{av,a}^2 \cdot \sigma_{R_{av}}^2 + (1 - p_{av,a})^2 \cdot \sigma_{R_{hv}}^2 \geq 0$  が成り立つから,  $CV[C_a]$  を最小とするリンク交通量に対する AV 車両の比率  $p_{av,a}$  は (C5) 式に表せる.

$$p_{av,a}^* = \frac{\sigma_{R_{hv}}^2}{\sigma_{R_{av}}^2 + \sigma_{R_{hv}}^2} \quad (C5)$$

(C5) 式において,  $R_{av}$  が確率変数となるとき, すなわち  $\sigma_{R_{av}}^2 > 0$  のとき  $CV[C_a]$  を最小とする  $p_{av,a}$  が 0 から 1 の範囲で存在する. また,  $R_{av}$  が定数, すなわち  $\sigma_{R_{av}}^2 = 0$  のときは  $CV[C_a]$  は  $p_{av,a}$  が 0 から 1 の区間で単調に減少する.

## 参考文献

- 1) Nakayama, S., Takayama, J., Traffic network equilibrium model for uncertain demands. *Proceedings of the 82<sup>nd</sup> Transportation Research Board Annual Meeting*, 2017.
- 2) Clark, S., Watling, D., Modeling network travel time reliability under stochastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol.39, No.2, pp.119-140, 2005.
- 3) Lam, W.H.K., Shao, H. and Sumalee, A., Modeling impacts of adverse

weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply, *Transportation research Part B*, Vol.42, No.10, pp.890-910, 2008.

- 4) Uno, N., Kurauchi, F., Tamura, H. and Iida, Y., (2009) Using bus probe data for analysis of travel time variability, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.2-15, 2009.
- 5) Zhou, Z. and Chen, A., Comparative analysis of three user equilibrium models under stochastic demand, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.42, No.3, pp.239-263, 2008.
- 6) Sumalee, A. and Xu, W., First-best marginal cost toll for a traffic network with stochastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.1, pp.41-59, 2011.
- 7) Zhang, K. and Nie, Y., Mitigating the impact of selfish routing: An optimal-ratio control scheme (ORCS) inspired by autonomous driving, *Transportation Research Part C*, Vol.87, pp.75-90, 2018.
- 8) Bagloee, S. A., Sarvi, M., Priksson, M. and Rajabifard, A., A mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.32, pp.562-580, 2017.
- 9) 峪龍一, 内田賢悦, 自動運転車両の普及過程における移動時間信頼性を考慮した交通量配分モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.58, CD-ROM, 2018.
- 10) Wang, J., Peeta, S., & He, X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 139-168, 2019.
- 11) Seo, T., & Asakura, Y. Endogenous market penetration dynamics of automated and connected vehicles: Transport-oriented model and its paradox. *Transportation Research Procedia*, 27, 238-245, 2017.
- 12) Nguyen S., Dupuis C., An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs, *Transportation Science*, Vol.18, No.2, pp.185-202, 1984.

(Received ?? ??, ????)

(Accepted ?? ??, ????)

## Development of a Multi-Class Traffic Assignment Model Considering Travel Time Reliability in the Spreading Process of Automated Vehicles

Sho NITTA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposes a multi-user-class traffic assignment model by which the effects of mixed flow of Autonomous Vehicles (AVs) and Human driven Vehicles (HVs) on a road network can be calculated. The proposed model distinguishes the difference in path choice behavior of AVs and HVs in the network. AVs

is assumed to follow user equilibrium principle whereas HVs is assumed to follow stochastic user equilibrium principle in their path choice. Stochastic and variable traffic capacity that is calculated from the mixed link flow of AVs and HVs is introduced to the model. In calculating the stochastic capacity, this study assumes that the mean and the variance of AVs' critical headway time are smaller than those of HVs'. Uncertainty of travel time in this study is brought by both the stochastic capacity and traffic demands. Numerical calculations are carried out in a test network to demonstrate the model proposed in this study.