自動運転車両普及過程における 移動コストの効率性と公平性を考慮した 自動運転車両車頭時間の設定に関する研究

新田　翔[1]・峪　龍一[2]・内田　賢悦[3]

[1]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: n96sho1203@eis.hokudai.ac.jp

[2]正会員　北海道大学大学院工学研究院土木工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）
E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

[3]正会員　北海道大学大学院工学研究院土木工学部門（〒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，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はHVより効率的な経路を選択すると考えられる．そこで本研究では，AVとHVの車両間に生じる移動コストの格差に着目し，移動コストの効率性と公平性の両方を考慮した，AVの車頭時間を設計するモデルを提案する．このモデルでは移動時間信頼性を考慮した交通量配分モデルを用いて，AVの普及がリンク交通容量に与える影響，AVとHVとの経路選択行動の違いを表現している．テストネットワークにおける数値計算を通して，AVの普及過程における移動コストの効率性と公平性の両面で最適なAV車頭時間を設計できることを示した．

Key Words : *Autonomous Vehicle, Travel Time Reliability, Traffic Assignment Model, Headway Time*

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，リンク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は道路インフラ施設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されている．そのためAVは，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．そこで本研究では，AVとHVとの間に移動時間の格差が生じることに着目した．AVとHVが混在する道路ネットワークにおける交通量配分モデルを用いて，格差に関する機会制約を設けた最適化問題を解くことにより，移動時間の効率性と公平性の両方を考慮した，AVの最適な車頭時間を設計する．このモデルでは，移動時間信頼性の観点から，交通需要とリンク交通容量の不確実性が移動時間に与える影響を表現している．

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[1)] は二項分布に従う交通需要を提案した．Clark and Watling[2)] はポアソン分布に従う交通需要を提案した．また，Lam et al.[3)] は正規分布に従う交通需要を提案した．しかし，Uno et al.[4)] 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[5)]，Sumalee and Xu[6)] 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[7)]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.[8] 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．峪，内田[9]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.[10] 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[11]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.[10] 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適用する．また，テストネットワークにおける交通量配分を行い，道路ネットワークにおける移動コストに関する効率性と公平性の観点から，最適なAVの車頭時間の設定を求める．

本研究の構成は以下の通りである．2章では，交通量配分モデルとAVの車頭時間の設定を求める最適化問題の定式化を行う．3章では，提案したモデルの活用として，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，それ以外のときに 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
α_a, β_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
$g_{w,k}^{hv}$: OD ペア w における経路 k の一般化費用
D: HV ドライバーに生じる AV との移動時間の格差
d_t: 機会制約における格差の基準値
p_t: 機会制約における格差がd_t以下となる確率の基準値

(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．

$$Q \sim LN(\mu_Q, \sigma_Q^2) \tag{1}$$

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．

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

同様にして，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．

$$Q_w^z = p_w^z \cdot Q^z \ \ \forall w \in W \tag{3}$$

ここで，以下の関係が成立する．

$$\sum_{w \in W} p_w^z = 1 \tag{4}$$

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．

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

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．

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

ここで，以下の関係が成立する．

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

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．

$$V_a = V_a^{hv} + V_a^{av}$$
$$= \hat{p}_a^{hv}\cdot Q + \hat{p}_a^{av}\cdot Q$$
$$= \hat{p}_a\cdot Q \ \ \forall a\in A \qquad (8)$$

ここで，以下の関係が成立する．

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

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．

$$V_a \sim LN\left(\mu_{V_a},\sigma_{V_a}^2\right) \qquad (10)$$

ここで，以下の関係が成立する．

$$\mu_{V_a} = \mu_Q + \ln(\hat{p}_a) \qquad (10a)$$
$$\sigma_{V_a}^2 = \sigma_Q^2 \qquad (10b)$$

(3) リンク交通容量の定式化

本研究では，AV と HV が混在するリンクaにおける臨界車頭時間H_aは，基準車頭時間h_0と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との積として定める．また，h_0に対する各車両の臨界車頭時間の比率R_zは以下に示す対数正規分布に従うとする．

$$R_z \sim LN\left(\mu_{R_z},\sigma_{R_z}^2\right)\ z\in\{hv,av\} \qquad (11)$$

対数正規分布は正規分布を指数変換した分布である．そのため，正規分布に従う確率変数の算術平均は，対数正規分布に従う確率変数の幾何平均に対応していることに注意されたい．ここで，AV と HV が混在する車群から，n台抽出し，AV がn_a台，HV がn_h台であったとする．抽出されたn_a台の AV の各車両に 1 から順に番号を振り，i番目の車両の観測された臨界車頭時間の比率をr_{av}^iとおく．HV についても同様にして，抽出されたn_h台の HV の各車両に 1 から順に番号を振り，j番目の車両の観測された臨界車頭時間の比率をr_{hv}^jとおく．ここで，抽出されたn台の臨界車頭時間の比率に関する幾何平均値r_aをとる試行を考える．このときの幾何平均値r_aは(12)式に表される．

$$r_a = \left(\prod_{i=1}^{n_a} r_{av}^i\cdot\prod_{j=1}^{n_h} r_{hv}^j\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (12)$$

ここで，$n = n_a + n_h$である．このとき，(12)式は積に関する再生性から抽出されたn台の臨界車頭時間の比率に関する幾何平均値r_aは以下に示す対数正規分布からのランダムサンプリングとみなすことができる．

$$LN\left(\frac{n_a}{n}\cdot\mu_{R_{av}} + \frac{n_h}{n}\cdot\mu_{R_{hv}},\left(\frac{n_a}{n}\right)^2\cdot\sigma_{R_{av}}^2 + \left(\frac{n_h}{n}\right)^2\cdot\sigma_{R_{hv}}^2\right) \qquad (12a)$$

この抽出した台数nを十分大きくしたとき，$\frac{n_a}{n}\to p_{av,a}$，$\frac{n_h}{n} = 1-\frac{n_a}{n}\to 1-p_{av,a}$に収束する．$p_{av,a}$はリンク$a$における AV の比率であり，(13)式に表される．

$$p_{av,a} = \frac{V_a^{av}}{V_a} = \frac{\hat{p}_a^{av}}{\hat{p}_a}\ \ \forall a\in A \qquad (13)$$

上述したランダムサンプリングによって抽出したn台の臨界車頭時間の比率に関する幾何平均値r_aを求める計算を複数回行うことを考える．繰り返し数を十分に大きくすると，r_aは混合交通流V_aの臨界車頭時間の比率R_aに収束する．したがって，臨界車頭時間の比率R_aは(14)式に表される．

$$R_a = R_{av}^{p_{av,a}}\cdot R_{hv}^{1-p_{av,a}}\ \ \forall a\in A \qquad (14)$$

ここで，h_0に対する車両zの臨界車頭時間の比率が(11)式に示す互いに独立な対数正規分布：$R_z\sim LN\left(\mu_{R_z},\sigma_{R_z}^2\right)$に従う場合，$R_a$は(15)式に示す対数正規分布に従う．

$$R_a \sim LN\left(\mu_{R_a},\sigma_{R_a}^2\right) \qquad (15)$$

ここで，以下の関係が成立する．

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

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)式に表される．

$$H_a = h_0\cdot R_a\ \ \forall a\in A \qquad (16)$$

リンク交通容量は，その定義から(17)式に表される．

$$C_a = \frac{3600}{H_a} = \frac{3600}{h_0\cdot R_a}\ \ \forall a\in A \qquad (17)$$

(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．

$$C_a \sim LN\left(\mu_{C_a},\sigma_{C_a}^2\right) \qquad (18)$$

ここで，以下の関係が成立する．

$$\mu_{C_a} = \ln(3600) - \ln(h_0) - \mu_{R_a} \qquad (18a)$$
$$\sigma_{C_a}^2 = \sigma_{R_a}^2 \qquad (18b)$$

(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．

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

ここで，(19)式に(8)，(17)式を代入すると，(20)式を得る．

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

(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．

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

(21)式両辺の自然対数をとると，(22)式を得る．

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

(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．

$$T'_a \sim LN\left(\mu_{T'_a}, \sigma^2_{T'_a}\right) \tag{23}$$

ここで，以下の関係が成立する．

$$\mu_{T'_a} = \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) + \beta_a \cdot \left\{\mu_Q + \mu_{R_a} + \ln(\hat{p}_a) + \ln(h_0) - \ln(3600)\right\} \tag{23a}$$

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

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．

$$E[T_a] = t_a^0 + E[T'_a] = t_a^0 + \exp\left(\mu_{T'_a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2_{T'_a}\right) \tag{24}$$

$$Var[T_a] = Var[T'_a] = \exp\left(2\mu_{T'_a} + \sigma^2_{T'_a}\right)\left(\exp\left(\sigma^2_{T'_a}\right) - 1\right) \tag{25}$$

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

ここで，以下の関係が成立する．

$$\mu_{T'_a \cdot T'_b} = \ln(\alpha_a) + \ln(\alpha_b) + \ln(t_a^0) + \ln(t_b^0) + \beta_a \cdot \ln(\hat{p}_a) + \beta_b \cdot \ln(\hat{p}_b) + (\beta_a + \beta_b) \cdot \mu_Q - \beta_a \cdot \mu_{C_a} - \beta_b \cdot \mu_{C_b} \tag{26a}$$

$$\sigma^2_{T'_a \cdot T'_b} = (\beta_a + \beta_b)^2 \cdot \sigma_Q^2 + \beta_a^2 \cdot \sigma_{C_a}^2 + \beta_b^2 \cdot \sigma_{C_b}^2 \tag{26b}$$

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．

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

(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．

$$E\left[PT_{w,k}\right] = \sum_{a \in A} E[T_a] \cdot \delta_{w,k,a} \tag{28}$$

$$Var\left[PT_{w,k}\right] = \sum_{a \in A} Var[T_a] \cdot \delta_{w,k,a} + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b(\neq a) \in A} \delta_{w,k,a} \cdot \delta_{w,k,b} \cdot Cov[T_a, T_b] \tag{29}$$

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．

$$c_{w,k} = E\left[PT_{w,k}\right] + \gamma \cdot \sqrt{Var\left[PT_{w,k}\right]} \quad \forall w \in W, \forall k \in K_w \tag{30}$$

ここで，経路コストにおける分散項の係数γ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TT_a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．

$$TT_a = V_a \cdot T_a = V_a \cdot t_a^0 + V_a \cdot T'_a \tag{31}$$

(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．

$$E[TT_a] = E[V_a \cdot T_a] = t_a^0 \cdot E[V_a] + E\left[V_a \cdot T'_a\right] \tag{32}$$

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

なお，$E[V_a \cdot T'_a]$，$Var[V_a \cdot T'_a]$と$Cov[V_a, V_a \cdot T'_a]$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．

$$TT = \sum_{a \in A} TT_a \tag{34}$$

(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．

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

$$Var[TT] = \sum_{a \in A} Var[TT_a] + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b(\neq a) \in A} Cov[TT_a, TT_b] \tag{36}$$

なお，$Cov[TT_a, TT_b]$の導出過程は**付録 B** に示す．

(5) 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．そこでは，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.[10]と同様に，HV に関する一般化経路費用を(37)式に定める．

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

ここで，$f_{w,k}^{hv}$，$q_{w,k}^{hv}$はそれぞれ$E\left[F_{w,k}^{hv}\right], E\left[Q_{w,k}^{hv}\right]$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．

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

s. t.

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

$$f_{w,k}^{hv} \geq 0 \tag{40}$$

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．

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

s. t.

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

$$f_{w,k}^{av} \geq 0 \tag{43}$$

(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．

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

ただし，制約条件は(39)，(40)，(42)，(43)式である．

(6) 格差に関する最適化問題

本研究では，HV ドライバーは SUE 配分原則に従って経路を選択するとしている．そのため，ある OD 間において，経験する移動コスト $c_{w,k}$ が最小とならない経路を選択する HV ドライバーが存在する．対して，AV は UE 配分原則に従うため，ある OD 間において経験する移動コストはすべての車両で等しくなる．したがって，AV と HV 間には経路コストの格差が生じる．道路ネットワーク全体における，この格差を(45)式で表す．

$$D = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} F_{w,k}^{hv} \cdot \left(c_{w,k} - c_w^*\right) \tag{45}$$

ここで c_w^* は OD ペア w における最小移動コストとする．公共政策の決定段階においては，道路ネットワークの移動コスト，すなわち効率性のみを考慮した政策決定がなされる．そこで本研究では，AV の普及過程において両車両間に生じる移動コストの格差に着目する．AV の車頭時間の設定を可変とし，HV ドライバーが経験する移動コストの格差Dがd_t以下となる場合の確率が，基準値p_tより大きくなるような設定を制約条件とする（機会制約）．その機会制約下において，総移動コストが最小となる AV の臨界車頭時間の設定を求める．ここで，総移動コストは，総移動時間の平均$E[TT]$と総移動時間の標準偏差$\sqrt{Var[TT]}$に時間信頼性比γを乗じた値との和と定義する．この問題は，基準車頭時間に対する AV の臨界車頭時間の比率R_{av}の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$を説明変数とする最適化問題として，(46)式に表される．

$$\min E[TT] + \gamma \cdot \sqrt{Var[TT]} \tag{46}$$

w.r.t. $\mu_{R_{av}}$ s.t.

$$\mu_{R_{av,min}} \leq \mu_{R_{av}} \leq \mu_{R_{hv}} \tag{47}$$

$$\Pr(D \leq d_t) \geq p_t \tag{48}$$

ここで，(47)式の$\mu_{R_{av,min}}$は$\mu_{R_{av}}$が取りうる最小値を表す．この最適化問題では，総移動コストを求めるために(44)式に示した交通量配分を下位問題とする． なお，格差の基準値d_tは AV の普及段階によって，政策として決まる値であると設定する．そのため，d_tは総交通需要に対する AV の比率p_{av}によって定まる関数とする．

3. 数値計算

(1) 総移動コストの変動

本節では総交通需要に対するAVの比率とAVの臨界車頭時間の変化に伴う総移動コストの変化を分析する．ここでは，図-1に示すテストネットワークで数値計算を行った．このネットワークでは9つのODペアが存在し，各ODには4つの経路が存在する．このテストネットワークにおけるリンク1, 37, 38, 56, 60の自由流移動時間は15 [min]，その他のリンクはすべて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，α_a と β_a をそれぞれ 0.15，4と定める．1時間当たりの総交通需要の平均と変動係数はそれぞれ9,000 [pcu]，0.15と与えた．また，各車両に関するOD交通量はすべてのODペアで等しい値をとるものとする．また，信頼性比γ は1.0と定める．(29)式中の分散パラメータ θ は0.1とする．基準車頭時間h_0は2.0 [sec]，h_0 に対するHVの臨界車頭時間の比率R_{hv}の分布パラメータ$\mu_{R_{hv}}, \sigma_{R_{hv}}^2$はそれぞれ0.15, 0.010と設定した．このとき，HVの臨界車頭時間の平均$E[H_{hv}]$は約2.33[sec]となる．また，h_0 に対するAVの臨界車頭時間の比率R_{av}の分布パラメータ$\sigma_{R_{av}}^2$は0.010とした．また，交通量配分モデルにおける解の一意性を確保

するためには，リンクの移動コストが交通量に対して単調に増加しなければならない．そのため，提案したモデルにおいては，h_0に対する混合交通量V_a の臨界車頭時間の比率R_aの分散パラメータ$\sigma^2_{R_a}$が定数となる必要がある．そのためには，(15b)式において，分布パラメータは$\sigma^2_{R_{av}} = \sigma^2_{R_{hv}}$，かつ両車両の臨界車頭時間には完全相関の関係が成立しなければならない．R_{av}とR_{hv}に相関があるとき，R_aは対数正規分布に従わないが，ここでは(12)式に示した関係が成立すると仮定する．したがって，$\sigma^2_{R_{av}}$は0.010と設定した．総交通需要に対するAV の比率p_{av}と，h_0 に対するAVの臨界車頭時間の比率R_{av}の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$が変化するときの，総移動コストの変化を分析する．なお，p_{av}は0から1の範囲で，AV に関する臨界車頭時間の比率R_{av}の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$は-0.15から0.15の範囲で変化するものとして計算した．この範囲では，AVの臨界車頭時間の平均$E[H_{av}]$は1.73[sec]から2.33[sec]の範囲で変化する．

総移動コスト$E[TT] + SD[TT]$に関する数値計算の結果を**図-2** に示す．この結果から，基準臨界車頭時間に対する AV の臨界車頭時間の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$が減少，AV の臨界車頭時間が短くなるにしたがって，総移動コストは減少する傾向が示された．また，総交通需要に対する AV の比率p_{av}が 0.9 付近まで増加するにしたがって，総移動コストは減少する傾向が示された．

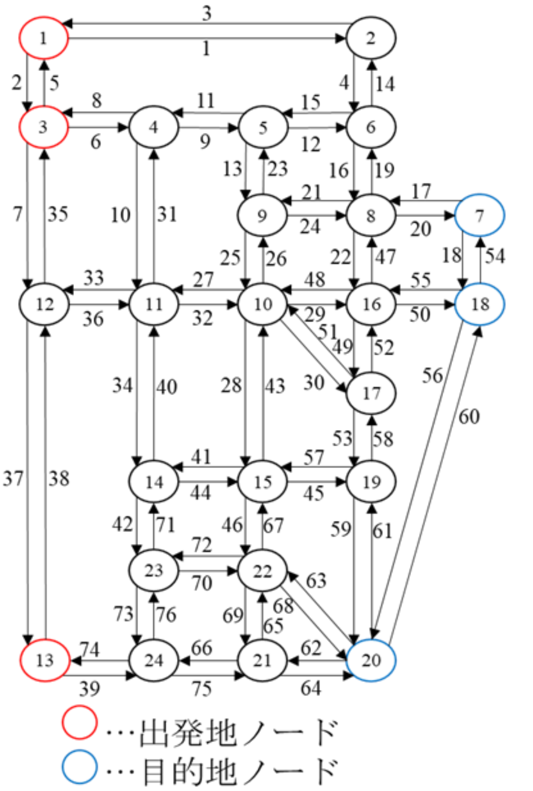

図-1　テストネットワーク

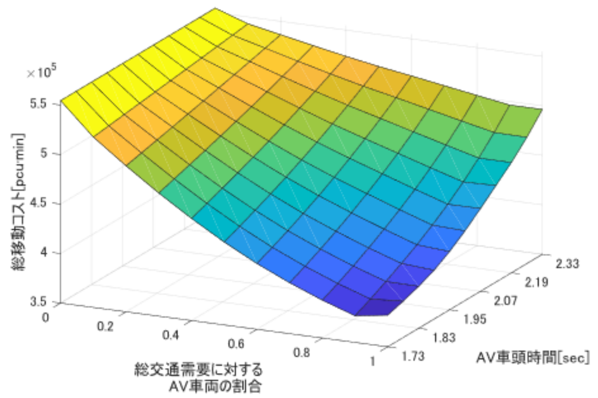

図-2　総移動コストの変動

(2)　格差の平均$E[D]$の変動

本節では総交通需要に対するAVの比率とAVの臨界車頭時間の変化に伴う，HVドライバーに生じる格差の平均値$E[D]$の変化を分析する．前節に示したテストネットワークにおいて，p_{av}は0.1から1の範囲で，AV に関する臨界車頭時間の比率R_{av}の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$は-0.15から0.15の範囲で変化するものとして計算した．この範囲では，AVの臨界車頭時間の平均$E[H_{av}]$は1.73[sec]から2.33[sec]の範囲で変化する．

計算結果の一部として，$p_{av} = 0.1, 0.15, 0.2$の普及段階における数値計算の結果を**図-3**に示す．この結果から，総交通需要に対するAV の比率p_{av}が増加するにしたがって，格差を経験するHVの需要が減少するため，格差の平均$E[D]$は減少することが示された．また，基準臨界車頭時間に対するAVの臨界車頭時間の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$が減少，AVの臨界車頭時間が短くなるにしたがって，格差の平均$E[D]$は減少する傾向が示された．これは，両車両の車頭時間，すなわち運転挙動の差が大きくなると，移動時間の格差が拡大することを示している．この傾向はその他の普及段階p_{av}においても確認された．また，総移動コストttcがAVの臨界車頭時間の増加に対して減少することに対して，格差の平均$E[D]$は増加する傾向が示された．このことから移動コストの効率性と公平性はトレードオフの関係性にあることが示された．

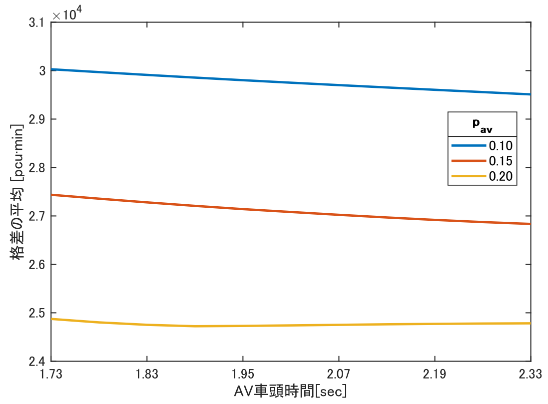

図-3　格差の平均の変動

(3) 格差に関する最適化問題

本節では，AVの各普及段階にて(46)-(48)式に示した機会制約付き最適化問題を解いて，ネットワークにおける公平性と効率性を考慮したAVの臨界車頭時間の分布パラメータ$\mu_{R_{av}}$を求める．この問題を解いて得られた解を$\mu^*_{R_{av}}$と表す．本章(1)節に示したテストネットワークにおいて総交通需要に対するAV車両の比率p_{av}を与え計算を行った．また，この計算における格差の基準値d_tは，HV1台当たりの格差の平均値が3.75[min]となるように，(49)式のように定めた．

$$d_t(p_{av}) = 3.75 \cdot (1 - p_{av}) \cdot E[Q] \qquad (49)$$

また，(48)式での制約の基準となる確率p_tは0.95と定めた．

(49)式に示した格差の基準値$d_t(p_{av})$の設定ではp_{av}が0.10以上0.16以下の範囲で解が得られた．そこで，総交通需要に対するAVの比率p_{av}が0.09以上0.17以下の範囲において，格差の95パーセンタイル値の車頭時間に対する推移を**図-4**に示す．また，得られた解の詳細な結果を**表-1**に示す．**図-4**において，ある普及段階p_{av}での格差の95パーセンタイル値の曲線と，基準値$d_t(p_{av})$を表す横軸に平行な直線との交点が，与えられたp_{av}における最適化問題の解である．p_{av}が0.09以下の普及段階では，範囲に含まれるすべての$\mu_{R_{av}}$に対して，格差Dの95パーセンタイル値がその普及段階における$d_t(p_{av})$よりも大きくなるため，解が存在しないという結果が得られた．また，p_{av}が0.17以上の範囲では，範囲に含まれるすべての$\mu_{R_{av}}$に対して，格差Dの95パーセンタイル値が，その普及段階における$d_t(p_{av})$よりも小さくなるため，この範囲においては(48)式の機会制約が効果を持たないという結果が得られた．

ここで，この最適化問題の解の存在範囲と格差の基準値$d_t(p_{av})$との関係の模式図を**図-5**に示す．この問題において，ある格差の基準値$d_t(p_{av})$とAV車両の比率p_{av}を与えたときに，解$\mu^*_{R_{av}}$が存在する領域は**図-5**中のグレーの領域として表される．また(49)式より，本稿の数値計算における$d_t(p_{av})$は直線として，**図-5**中の赤色の破線に表される．

これらの領域と直線が共有点をもつ範囲の普及段階p_{av}においては，最適化問題の解が存在し，移動コストの効率性と公平性の両方を考慮したAVの車頭時間の設定が求められる．また，格差の基準値$d_t(p_{av})$を表す直線が解の存在領域の下側にある場合，その範囲の普及段階p_{av}において，格差の基準値$d_t(p_{av})$は，解が存在する格差の範囲の下限値より小さいため，最適化問題の解が存在しない．対して，$d_t(p_{av})$を表す直線が解の存在領域の上側にある場合，その範囲の普及段階p_{av}において，格差の基準値$d_t(p_{av})$は，解が存在する格差の範囲の上限値より大きいため，機会制約が効果を持たない状態であるといえる．

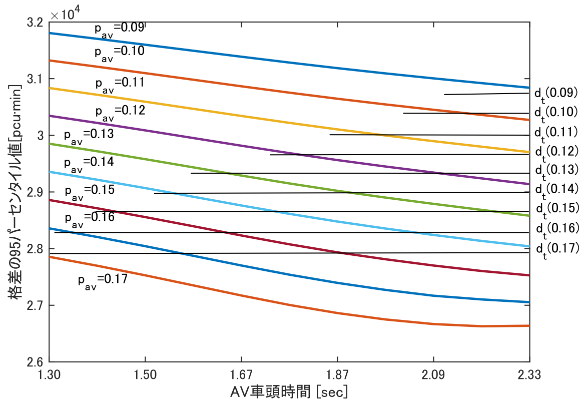

図-4 格差の95パーセンタイル値の推移

表-1 各p_{av}について得られた最適車頭時間の設定

AVの比率 p_{av}	格差の基準値 d_t[pcu· min]	解 $\mu^*_{R_{av}}$	$\mu^*_{R_{av}}$に対応する$E[H_{av}]$ [sec]
0.10	3.04×10^4	0.086	2.19
0.11	3.00×10^4	-0.036	1.94
0.12	2.97×10^4	-0.131	1.76
0.13	2.94×10^4	-0.208	1.63
0.14	2.90×10^4	-0.274	1.53
0.15	2.87×10^4	-0.336	1.44
0.16	2.84×10^4	-0.397	1.35

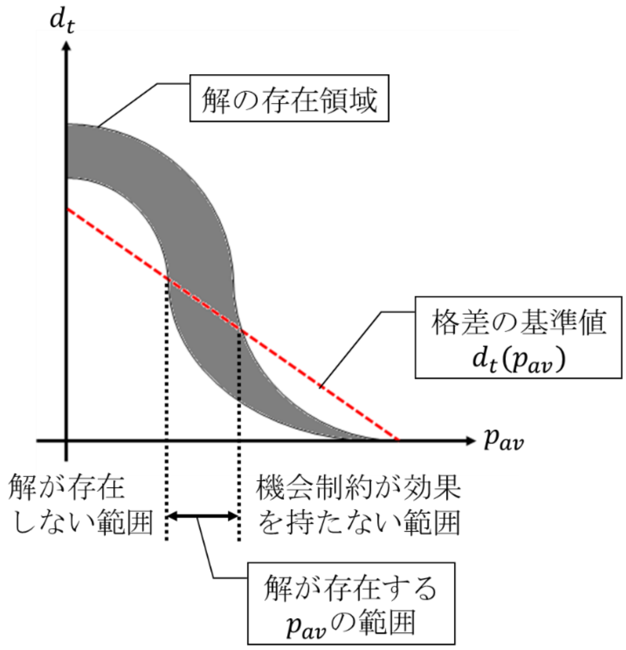

図-5 最適化問題の解の存在領域と$d_t(p_{av})$との関係

4. おわりに

本研究では，AVとHVが混在する道路ネットワークにおける交通量配分モデルを用いて，移動時間の効率性，公平性の両方を考慮した，AVの最適な車頭時間の設計手法を提案した．提案した手法では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ユーザクラスの交通量配分モデルを適用した．また，テストネットワークにおいて提案したモデルを用いた数値計算を行い，AVの車頭時間の増加に対して，総移動コストと移動時間の格差にはトレードオフの関係があることを示した．また，提案した最適化問題を解くことにより，移動時間の効率性，公平性の両方を考慮した，AVの最適な車頭時間を推計した．

また，今後の課題としては格差に関する最適化問題について，解の存在範囲を求める必要があると考える．本研究で提案したAVの車頭時間の設計手法が適用できる普及段階を明らかにし，より政策決定に資する手法へ改善を図りたい．

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．

$$V_a \cdot T_a' = V_a \cdot t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot \left(\frac{V_a}{C_a}\right)^{\beta_a} = t_a^0 \cdot \alpha_a \cdot V_a^{\beta_a+1} \cdot C_a^{-\beta_a} \qquad (A1)$$

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．

$$V_a \cdot T_a' \sim LN\left(\mu_{V_a \cdot T_a'}, \sigma^2_{V_a \cdot T_a'}\right) \qquad (A2)$$

ここで，以下の関係が成立する．

$$\mu_{V_a \cdot T_a'} = \ln(t_a^0) + \ln(\alpha_a) + (\beta_a + 1) \cdot \mu_{V_a} - \beta_a \cdot \mu_{C_a} \qquad (A2a)$$

$$\sigma^2_{V_a \cdot T_a'} = (\beta_a + 1)^2 \cdot \sigma^2_{V_a} + (\beta_a)^2 \cdot \sigma^2_{C_a} \qquad (A2b)$$

したがって，$V_a \cdot T_a'$の平均と分散は(A3)，(A4)式に表せる．

$$E[V_a \cdot T_a'] = \exp\left(\mu_{V_a \cdot T_a'} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2_{V_a \cdot T_a'}\right) \qquad (A3)$$

$$Var[V_a \cdot T_a'] = (E[V_a \cdot T_a'])^2 \cdot \left\{\exp\left(\sigma^2_{V_a \cdot T_a'}\right) - 1\right\} \qquad (A4)$$

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．

$$\begin{aligned} Cov[V_a, V_a \cdot T_a'] &= E[V_a \cdot (V_a \cdot T_a')] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T_a'] \\ &= E[V_a^2 \cdot T_a'] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T_a'] \\ &= E[D_a] - E[V_a] \cdot E[V_a \cdot T_a'] \qquad (A5) \end{aligned}$$

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．

$$D_a \sim LN\left(\mu_{D_a}, \sigma^2_{D_a}\right) \qquad (A6)$$

ここで，以下の関係が成立する．

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

$$\sigma^2_{V_a \cdot T_a'} = (\beta_a + 1)^2 \cdot \sigma^2_{V_a} + (\beta_a)^2 \cdot \sigma^2_{C_a} \qquad (A6b)$$

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．

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

ここで，右辺の第 1 項を展開すると，(B2) 式を得る．

$$\begin{aligned} &E[TT_a \cdot TT_b] \\ &= E[(t_a^0 \cdot V_a + V_a \cdot T_a') \cdot (t_b^0 \cdot V_b + V_b \cdot T_b')] \\ &= E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (t_b^0 \cdot V_b)] + E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T_b')] \\ &\quad + E[(t_b^0 \cdot V_b) \cdot (V_a \cdot T_a')] + E[(V_a \cdot T_a') \cdot (V_b \cdot T_b')] \qquad (B2) \end{aligned}$$

(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．

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

$$\begin{aligned} &E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T_b')] \\ &= t_a^0 \cdot E[V_a \cdot V_b \cdot T_b'] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b \cdot E\left[Q^{\beta_b+2}\right] \cdot E\left[C_b^{-\beta_b}\right] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_b \cdot \hat{p}_a \cdot \hat{p}_b^{\beta_b+1} \\ &\cdot \exp\left((\beta_b + 2) \cdot \mu_Q + \frac{1}{2}(\beta_b + 2)^2 \cdot \sigma_Q^2\right) \\ &\cdot \exp\left(-\beta_b \cdot \mu_{C_b} + \frac{1}{2}\beta_b^2 \cdot \sigma^2_{C_b}\right) \qquad (B4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &E[(t_a^0 \cdot V_a) \cdot (V_b \cdot T_b')] \\ &= t_a^0 \cdot t_b^0 \cdot \alpha_a \cdot \hat{p}_a^{\beta_a+1} \cdot \hat{p}_b \\ &\cdot \exp\left((\beta_a + 2) \cdot \mu_Q + \frac{1}{2}(\beta_a + 2)^2 \cdot \sigma_Q^2\right) \\ &\cdot \exp\left(-\beta_a \cdot \mu_{C_a} + \frac{1}{2}\beta_a^2 \cdot \sigma^2_{C_a}\right) \qquad (B5) \end{aligned}$$

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

参考文献

1) Nakayama, S., Takayama, J., Traffic network equilibrium model for uncertain demands. *Proceedings of the 82nd 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., Ptriksson, 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.

(????. ?. ? 受付)

Research of the Designing of the Critical Headway Time of Autonomous Vehicles with Considering the Efficiency and the Equity of Travel Cost in the Spreading Process of Autonomous Vehicles

Sho NITTA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposes a design method of Critical Headway Time (CHT) of Autonomous Vehicles (AVs) considered the efficiency and the equity of travel cost. This study focuses on not only the efficiency of the road network but also the equity of travel cost between HV drivers and AV passengers. We formulate the optimization problem with chance constraint about the gap of travel cost. Multi-user-class traffic assignment model by which the effects of mixed flow of AVs and Human driven Vehicles (HVs) on a road network is applied to this method. The proposed model describes difference between path choice behaviors of AVs and HVs based on the difference of information acquisition in the network and the CHT of each vehicle type. Stochastic traffic capacity that is calculated from the mixed link flow of AVs and HVs. Uncertainty of travel time in this study is expressed by the stochastic capacity and stochastic traffic demands. Numerical calculations in a test network are presented to demonstrate the proposed method.