準自動運転車と手動運転車の混在流を対象とした需要変動型交通量配分モデル

田子　喬一[1]・栗原　脩斗[2]・峪　龍一[3]・内田　賢悦[4]

[1]学生員　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: tgkq0713@eis.hokudai.ac.jp

[2]学生員　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: manyon819@eis.hokudai.ac.jp

[3]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

[4]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: uchida@eng.hokudai.ac.jp

特定の道路リンクにおいてのみ自動走行が可能な準自動運転車(SAV)と従来の手動運転車(HV)が混在する状況を想定した，マルチクラス需要変動型確率的利用者均衡配分モデルを提案する．道路ネットワークは(i)自動運転により走行する SAV と HV が利用可能なリンク，(ii)自動運転により走行する SAV のみが利用可能なリンク，(iii)手動運転により走行する SAV と HV が利用可能なリンクで構成されるものとする．SAV のドライバーは走行するリンクの種類に応じた異なる時間価値を持つため，SAV と HV のドライバーは同じ経路を走行した場合においても異なる効用を持つ可能性がある．最後にテストネットワークを用いて数値計算を行い，提案するモデルの挙動を確認する．

Key Words: *autonomous driving, multi-class, value of time, expressway, variable demand, mixed flow*

1. はじめに

近年，自動運転に関する技術は急速に発展しており，交通状況もそれに伴い大きく変化することが予想される．特に，自動運転により運転挙動が効率化するため，自動運転車同士，または自動運転車と手動運転車の間で車間距離が短くなり，交通容量が増加し，渋滞や交通事故が減少することが期待される．官民 ITS 構想・ロードマップ 2020[1)]によると，自動運転車 (AV) は，その自動運転レベルにより 0 から 5 までの 6 段階に分類される．

その内のレベル 4 では，高速道路上など限られた環境でのみの完全自動運転が行われ，レベル 5 では高速道路，一般道関係なく完全自動運転が行われると規定されている．

2022 年現在，国土交通省[2)]は 2025 年を目途に高速道路上での完全自動運転(レベル 4)の実現を掲げている．また，時期は未定であるものの高速道路に限定しない完全自動運転(レベル 5)も見通されており，自動運転車の普及は進んでいくと考えられる．ただ，レベル 5 は技術的，法律的な問題が数多く存在し，その実現までに時間を要することが予想されるため，自動運転レベル 4 の自動運転車と従来の手動運転車 (HV) が混在する状況が長く続くと考えられる．

近年，準自動運転車の普及を前提として，道路ネットワークを分析する手法の開発が行われている．Wu et al[3)]はレベル 4 にあたる自動運転による走行が可能な高速道路と，手動運転でのみ走行が可能な一般道が混在する小規模ネットワークを用いて均衡条件を示し，感度分析を行った．この中で，自動運転時・手動運転時それぞれに設定された時間価値と高速道路の出口位置の変化が均衡フローにどのような影響を及ぼすかを明らかにした．

Wang et al[4)]は混在流における自動運転車と手動運転車の反応時間の違いを考慮した交通容量を設定し，弾性需要によるマルチクラス交通量配分問題 (MTA-ED 問題) を提案した．さらにレベル 5 の自動運転車に無料アクセスを許可する一方で，手動運転車には通行料を支払うことでアクセスを許可する AVT (autonomous vehicle/toll) レーンにおいて交通量が均衡フローに与える影響を推定した．

先行研究では自動運転レベル 5 の状況を想定した研究は多く存在する．一方で，自動運転レベル 4 に相当する自動運転車が実現した社会におい

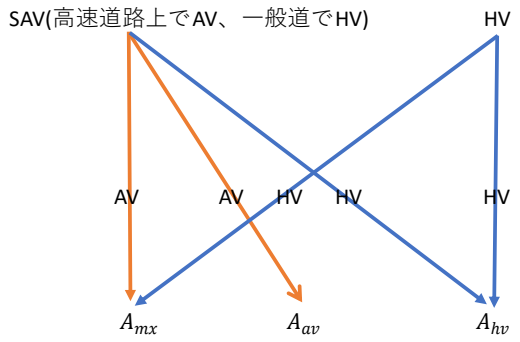


図-1　2 種類の車両と 3 種類のリンク集合

て，自動運転で走行可能なリンク(AV 高速道路)と手動運転のみで走行可能なリンク(非自動運転道路)の両方がネットワーク上に存在し，さらに，自動運転車と手動運転車が同じ道路空間に共有する交通システムを明示的にモデル化して分析する研究は少ない．

本研究は，Wu et al[3]と Wang et al[4]のそれぞれの設定をともに含む一般化された枠組みとして，一般道では手動走行し，高速道路上でのみ AV として自動走行する準自動運転車(SAV)と，従来の手動運転車 (HV)の混合流を前提とするネットワークレベルの交通量配分モデルを提案する．

また，以下に示す 3 種類のリンクから構成される道路ネットワーク上での交通状況を想定する．

・AV として走行する CAV と HV が利用可能な高速道路リンク
・AV として走行する CAV のみが利用可能な高速道路リンク
・HV として走行する CAV と HV が利用可能な一般道リンク

リンクの交通容量は各車両の先行車の挙動に対する追従車の反応時間の影響を受けるため，前述の SAV と HV が混在する状況では，HV のみの状況とは異なるリンクの交通容量になることが予想される．本研究では，リンクの種類によって異なる交通容量と，車両が AV，HV どちらのモードで走行するかによって異なる値をとる時間価値を考慮し，SAV と従来の HV が混在するネットワークにおける需要変動型交通量配分モデルを提案する．

2. モデルの定式化

(1) 記号

本項で用いる記号を以下に示す．

W	OD ペア集合
K_w	OD ペア$w(\in W)$における経路集合
A	リンク集合　$(A = A_{mx} \cup A_{av} \cup A_{hv})$
A_{mx}	AV として走行する SAV と HV が利用可能な高速道路リンクの集合
A_{av}	AV として走行する SAV のみが利用可能な高速道路リンクの集合
A_{hv}	HV として走行する SAV と HV が利用可能な一般道リンクの集合
$\Omega_{\mathbf{f}}$	実行可能な経路交通量ベクトルの集合
$\Lambda_{\mathbf{z}}$	OD パスインシデンス行列
q_w	OD ペアwでの交通需要
q_w^z	OD ペアwにおける車両$z \in \{hv, sav\}$の交通需要 (添字hv, savはそれぞれ車両 HV，SAV を表す)
q_w^{z*}	均衡状態における OD ペアw間の交通需要
$f_{w,k}^z$	OD ペアwにおける経路k上の車両z の交通量
$f_{w,k}^{z*}$	車両zの利用者均衡状態における OD ペア間wの経路kの交通量
$\mathbf{f}$	経路交通量ベクトル
$\mathbf{f}^*$	均衡状態における経路交通量ベクトル
$\mathbf{f_z}$	車両zの経路交通量ベクトル
$\mathbf{f}_z^*$	車両zの均衡状態における経路交通量ベクトル
V_a	リンクaの交通量
$p_{av,\ a}$	リンクaの交通量に対する AV として走行する SAV 車両の比率
C_a	リンクaの交通容量
n_{mx}	リンク$a(\in A_{mx})$の車線数
n_{av}	リンク$a(\in A_{av})$の車線数
n_{hv}	リンク$a(\in A_{hv})$の車線数
ω_{hv}	HV の反応時間
ω_{av}	リンク$a(\in A_{mx})$における AV として走行する SAV の反応時間
ω'_{av}	リンク$a(\in A_{av})$における AV として走行する SAV の反応時間
μ	全車両の長さの平均
T_a	リンクaの移動時間
t_a^0	リンクaの自由移動時間
s_a^0	リンクaの自由移動速度
α_a, β_a	リンクaの BPR 関数のパラメータ
$T_{w,k}^{mx}$	OD ペアw間の経路kにおける AV として走行する SAV と HV が利用可能な高速道路上の移動時間
$T_{w,k}^{av}$	OD ペアw間の経路kにおける AV として走行する SAV のみが利用可能な高速道路上の移動時間
$T_{w,k}^{hv}$	OD ペアw間の経路kにおける HV として走行する SAV と HV が利用可能な一般道上の移動時間
$C_{w,k}^z$	OD ペアw間の経路kにおける車両z の経路コスト
C_w^z	OD ペアw間における車両zの最小経路コスト

$\mathbf{C}_z(\mathbf{f}^*)$ 車両zの経路コストのベクトル
$GC_{w,k}^z$ OD ペアw間の経路kにおける車両z の一般化コスト
$g_{w,k}^z$ OD ペアw間の経路kにおける車両z の配分コスト
VOT_{hv} 車両z の HV モードにおける自動車の時間価値
VOT_{av} 車両z の AV モードにおける自動車の時間価値
p_{mx} リンク$a(\in A_{mx})$の通行料金
p_{av} リンク$a(\in A_{av})$の通行料金
$P_{w,k}$ OD ペアw間の経路kにおける高速道路の通行料

(2) 交通流の定式化

OD ペアwにおける交通需要q_wと各車両の交通需要の関係は以下の式(1)で表せる．

$$q_w = \sum_{z\in\{hv,sav\}} q_w^z \tag{1}$$

OD ペアwにおける車両zの交通需要q_w^zは車両zの経路交通量の和となるため，式(2)で表せる．

$$q_w^z = \sum_{k\in K_w} f_{w,k}^z \tag{2}$$

where

$$f_{w,k}^z \geq 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W,\ z \in \{hv, sav\} \tag{3}$$

OD ペアwにおける経路k上の交通量 $f_{w,k}$は以下のように表される．

$$f_{w,k} = \sum_{z\in\{hv,sav\}} f_{w,k}^z \tag{4}$$

車両zのリンクaの交通量は，リンクaを通るすべての経路交通量の和であり，式(5)で表される．

$$V_a^z = \sum_{w\in W}\sum_{k\in K_w} \delta_w^{k,a}\cdot f_{w,k}^z \tag{5}$$

リンクaの交通量は式(6)で表される．

$$V_a = \sum_{z\in\{hv,sav\}} V_a^z \tag{6}$$

(3) リンク交通容量の定式化

Wang et al[5]を基に，リンクaにおける交通容量は以下の式(7)-(9)として表される．

$$C_a = s_a^0 \frac{n_{mx}}{s_a^0\cdot\left(\left(1-p_{av,a}\right)\cdot\omega_{hv} + p_{av,a}\cdot\omega_{av}\right)+\mu}$$

$$\forall a \in A_{mx} \tag{7}$$

$$C_a = s_a^0 \frac{n_{av}}{s_a^0\cdot\omega'_{av}+\mu},\ \forall a \in A_{av} \tag{8}$$

$$C_a = s_a^0 \frac{n_{hv}}{s_a^0\cdot\omega_{hv}+\mu}, \forall a \in A_{hv} \tag{9}$$

where

$$\omega_{hv} > \omega_{av} > \omega'_{av} \tag{10}$$

$$p_{av,\ a} = \frac{V_a^{sav}}{V_a}, \forall a \in A_{mx} \tag{11}$$

式(7)は AV として走行する SAV と HV が利用可能な高速道路リンク$(a \in A_{mx})$の交通容量を示しており，リンク内の AV として走行する SAV 車両の比率と，先行車の挙動に対する反応時間ω_{av}, ω_{hv}を考慮して表される．ただし HV の先行車の挙動に対する反応時間ω_{hv}は AV として走行する SAV の先行車の挙動に対する反応時間ω_{av}より大きくなるものとする．式(8)はリンク$(a \in A_{av})$を走行するすべての車両が AV 挙動すると仮定したときの交通容量を示している．このリンクでは AV 挙動をする車両のみが存在するため，リンク内の車両は先行車だけでなく，全車両の挙動が把握できることが想定される．よって先行車の挙動に対する反応時間ω'_{av}はω_{hv}, ω_{av}よりも小さくなるものとする．式(9)はリンク$(a \in A_{hv})$を走行するすべての車両が HV 挙動すると仮定したときの交通容量を示している．このリンクでは，全車両は HV として走行する．よって先行車の挙動に対する反応時間は式(7)で使用したω_{hv}を用いてリンク内の交通容量を表せる．

また，式(10)は各リンク集合における車両の先行車の挙動に対する追従車の反応時間の大小関係を示している．式(11)はリンク$(a \in A_{mx})$内において，AV として走行する SAV 車両の比率を示しており，リンク内交通量と AV として走行する SAV の交通量を用いて表せる．

(4) 移動時間の定式化

本研究におけるリンク移動時間は式(12)に示す BPR 関数によって算出する．

$$T_a(V_a^{hv}, V_a^{sav}) = t_a^0\cdot\left(1+\alpha_a\cdot\left(\frac{V_a^{hv}+V_a^{sav}}{C_a(V_a^{hv},V_a^{sav})}\right)^{\beta_a}\right)$$
$$\forall a \in A \tag{12}$$

(5) 一般化コストの定義

OD ペアw間の経路kの移動時間T_w^kは，経路上の各リンクの移動時間の和であり，式(13)の関係が成立する．

$$T_w^k = T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{av} + T_{w,k}^{hv} \tag{13}$$

where

$$T_{w,k}^{mx} = \sum_{a\in A_{mx}} \delta_w^{k,a}\cdot T_a(V_a^{hv}+V_a^{sav})$$
$$\forall a \in A_{mx}, \forall k \in K_w, \forall w \in W \tag{14}$$

$$T_{w,k}^{av} = \sum_{a \in A_{av}} \delta_w^{k,a} \cdot T_a(V_a^{hv} + V_a^{sav})$$
$$\forall a \in A_{av}, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (15)$$

$$T_{w,k}^{hv} = \sum_{a \in A_{hv}} \delta_w^{k,a} \cdot T_a(V_a^{hv} + V_a^{sav})$$
$$\forall a \in A_{hv}, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (16)$$

本研究における道路ネットワーク上のリンクは AV として走行する SAV と HV が利用可能な高速道路リンク($a \in A_{mx}$)，AV として走行する SAV のみが利用可能な高速道路リンク($a \in A_{av}$)，HV として走行する SAV と HV が利用可能な一般道リンク ($a \in A_{hv}$) の 3 種類である．高速道路リンクの通行料はリンクの種類ごとに異なると仮定する．OD ペアwにおける経路kの高速道路の通行料$P_{w,k}$は，経路を構成する高速道路リンクの通行料の和と定義し，以下の式(17)で表される．

$$P_{w,k} = \sum_{a \in A_{mx}} \delta_w^{k,a} \cdot p_{mx} + \sum_{a \in A_{av}} \delta_w^{k,a} \cdot p_{av} \quad (17)$$

OD ペアw間の経路kにおける各リンク上の移動時間に乗ずる時間価値は車種 ($z \in \{hv, sav\}$) のみによって決まるのではなく，各車両が AV，HV どちらの挙動をするかによって決まる．よって同じ車種であっても移動するリンクによって時間価値が異なる．以上より車両$z \in \{hv, sav\}$の一般化コストはそれぞれ式(18)(19)で表される．

$$GC_{w,k}^{hv} = VOT_{hv} \cdot \left(T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{hv}\right) + P_{w,k} \quad (18)$$

$$GC_{w,k}^{sav} = VOT_{av} \cdot \left(T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{av}\right) + VOT_{hv} \cdot T_{w,k}^{hv} + P_{w,k} \quad (19)$$

where

$$GC_{w,k}^{z}, \forall z \in \{hv, sav\} \quad (20)$$

(6) 需要変動の定式化

本研究では車種にかかわらず，HV，SAV 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[4]と同様に，配分コスト$g_{w,k}^{z}$を定める．

$$g_{w,k}^{z} = GC_{w,k}^{z} + \frac{1}{\theta} \cdot \ln\left(\frac{f_{w,k}^{z}}{q_w^{z}}\right) \quad (21)$$

θ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，車両は確度の高い情報を基に経路選択を行うことができる．OD ペアにおける均衡条件は，利用される経路の配分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．

また本研究では，OD 間の交通需要は固定的な値ではなく，OD 間の交通サービス水準の大小によって変化するとし，需要変動型の確率的利用者均衡を考慮する．

OD ペアw間における車両zの交通需要q_w^{z}は最小経路コストC_w^{z}の関数として式(22)で表される．

$$q_w^{z} = D_w^{z}(C_w^{z}), \forall w \in W \quad (22)$$

where

$$C_w^{z} = \min_{k \in K_w} C_{w,k}^{z}, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, sav\} \quad (23)$$

$$C_w^{z} \geq 0 \quad (24)$$

Wang et al[4]と同様に車両zの経路コストは逆需要関数を使い，式(25)で表される．

$$C_{w,k}^{z} = g_{w,k}^{z} - D_w^{-1,z}(q_w^{z*}), \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (25)$$

(7) 確率的利用者均衡配分の定式化

需要変動を考慮した確率的利用者均衡配分の条件は式(26)-(28)で表される．

$$f_{w,k}^{z} \cdot \left(C_{w,k}^{z} - C_w^{z}\right) = 0$$
$$\forall k \in K_w, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, sav\} \quad (26)$$

$$f_{w,k}^{z} \geq 0, \left(C_{w,k}^{z} - C_w^{z}\right) \geq 0$$
$$\forall k \in K_w, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, sav\} \quad (27)$$

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^{z} = D_w^{z}(C_w^{z})$$
$$\forall w \in W, \forall z \in \{hv, sav\} \quad (28)$$

式(28)は経路交通量の和が OD 間の交通需要に等しく，OD 間の交通需要が需要関数により定められることを表している．本研究では，SAV と HV の混在流を考慮した交通容量によってリンクコスト関数のヘシアンが非対称になるため，交通量配分問題を最適化問題として定式化できない．そこで，交通量配分問題を以下に示す変分不等式問題として定式化する．

$$\sum_{z \in \{hv, sav\}} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} C_{w,k}^{z}(\mathbf{f}^*) \cdot \left(f_{w,k}^{z} - f_{w,k}^{z*}\right) \geq 0 \quad (29)$$

ベクトル表記で定式化すると，式(29)となる．

$$\sum_{z \in \{hv, sav\}} \mathbf{C}_z(\mathbf{f}^*)^T \cdot (\mathbf{f}_z - \mathbf{f}_z^*) \geq 0 \quad (30)$$

where

$$\mathbf{f}_z^T \in \boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{f}} = \{\mathbf{f}_z^T \mid \wedge_z \mathbf{f}_z = \mathbf{q}_z; \mathbf{f}_z \geq \mathbf{0}\}, \quad \forall z \in \{hv, sav\}$$
$$\mathbf{f}^* = \left[\mathbf{f}_{hv}^{T\,*}, \mathbf{f}_{sav}^{T\,*}\right] \quad (31)$$

$\mathbf{C}_z(\mathbf{f}^*)$は車両$z$の経路コストをベクトルで表したものである．

3. 数値計算

(1) テストネットワークと計算条件の設定

テストネットワークによる数値計算を行い，モデルの挙動を確認する．使用するネットワークを

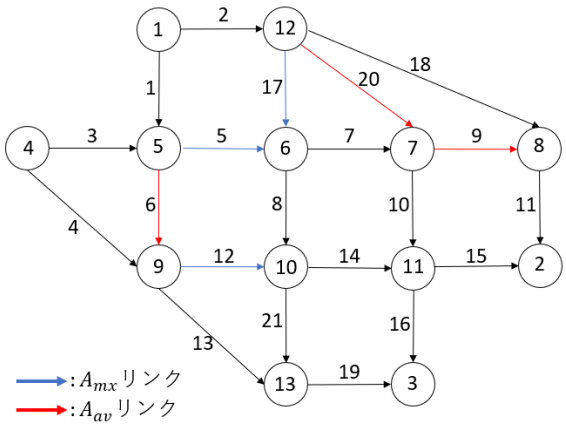


図-2　テストネットワーク

図-2 に示す．

テストネットワークは Nguyen-Dupuis(N-D) network．[6]を基に作成し，13 個のノード，21 本のリンクで構成されA_{mx}リンクを 5, 12, 17，A_{av}リンクを 6, 9, 20 とする．OD ペアは 1-2,1-3,4-2,4-3 の 4 つがあり，経路は合計 34 である．

なお本研究における仮定により HV はA_{av}リンクを通行することができないため経路がA_{av}リンクを含む場合，HV はその経路を通行することができない．

本ネットワークでは HV，SAV の各 OD ペアの交通需要を 5000[pcu/hour]とする．なおA_{mx}リンクの通行料金を 50[JPY/km]，A_{av}リンクの通行料金を 30[JPY/km]，VOT_{hv}を 2000[JPY/hour]，VOT_{av}を 1000[JPY/hour]とする．また総交通需要に対する SAV の比率を 0.5，式(21)の配分コストの算出に使用するθを 0.002 とする．

(2)　RSRS-MSRA アルゴリズム概要

ここでは Wang et al[4]に基づいて本研究で使用した RSRS-MSRA アルゴリズムの手順について記す．

$$\hat{\mathrm{f}}_{n+1} = \hat{\mathrm{f}}_n + \beta_n \Phi(\hat{\mathrm{f}}_n) = \begin{bmatrix} \hat{\mathrm{f}}_{n,hv} \\ \hat{\mathrm{f}}_{n,sav} \end{bmatrix} + \beta_n \begin{bmatrix} \Phi_{hv}(\hat{\mathrm{f}}_n) \\ \Phi_{sav}(\hat{\mathrm{f}}_n) \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\Phi_{hv}(\hat{\mathrm{f}}_n) = \left(\Phi^w_{k,hv}(\hat{\mathrm{f}}_n), \forall k \in \widehat{R_{hv}}^w, \forall w \in W_{hv}\right) \quad (33)$$

$$\Phi_{sav}(\hat{\mathrm{f}}_n) = \left(\Phi^w_{k,sav}(\hat{\mathrm{f}}_n), \forall k \in \widehat{R_{sav}}^w, \forall w \in W_{sav}\right) \quad (34)$$

ここで$\hat{\mathrm{f}}_{n,z}$はODペアwにおける車種zの反復回数nでのダミー経路を含む経路交通量ベクトルである．$\Phi_z(\hat{\mathrm{f}}_n)$は車種$z$の反復回数$n$での勾配を表し，$\widehat{R_z}^w$は OD ペア$w$における車種$z$の経路集合，$W_z$は車種$z$の OD ペア集合である．また$f^w_{k,z}(n)$は OD ペア$w$における車種$z$の反復回数$n$での$k$番目のダミー経路を含まない経路交通量である．

経路交通量ベクトルは，式(32)で示されるように，前の反復計算で求まった経路交通量ベクトルにステップサイズβ_nと勾配$\Phi(\hat{\mathrm{f}}_n)$の積を足していくことで求まる．次に，経路選択基準の求め方や，計算全体の手順について示す．手順はステップ 1 から 4 まで存在し，収束基準を満たすまで繰り返す．

a)　ステップ 1

反復回数を n＝0 とし，十分に大きい交通需要$q^w_{0,z}$を，対応する OD ペア間の全ての実経路とダミー経路へ車種ごとにそれぞれ割り当てる．得られたダミー経路も含めた経路交通量ベクトルを$\hat{\mathrm{f}}_0$とする．

b)　ステップ 2

すべての実経路フローに基づいて実ネットワークの OD 需要を計算する．逆需要関数，一般化コストを求め，本研究のモデルで使用した式(25)に基づき，経路選択基準を求める．ここで今回の計算にあたり使用した各車種，OD ペアごとの逆需要関数を式(35)に記す．

$$D_w^{-1,z}(n) = \frac{\sum_{k\in\widehat{R_z}^w} f^w_{k,z}(n)}{q^w_{0,z}} \cdot \ln\left(-\frac{\min\left(GC0^z_{w,k}\right)}{0.2}\right) \quad (35)$$

なお$GC0^z_{w,k}$は OD ペアwにおける車種zの経路kにおいて自由移動時間をリンク移動時間として算出した一般化コストである．

c)　ステップ 3

式(32)を基に経路交通量を更新する．

d)　ステップ 4

n=n+1 とする．ここで経路交通量が収束基準を満たしていれば，計算は終了，満たしていなければ，ステップ 2 に戻る．

(3)　通行料金の変化に伴う配分コストの変化

本節ではA_{mx}リンク，A_{av}リンクの通行料金の変化に伴う全車両，HV，SAV の配分コストの平均の変化を分析する．結果をそれぞれ図-3,4,5 に示す．

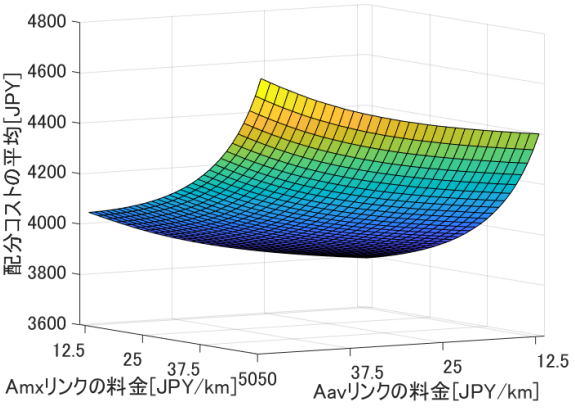


図-3　配分コストの平均(全車両)

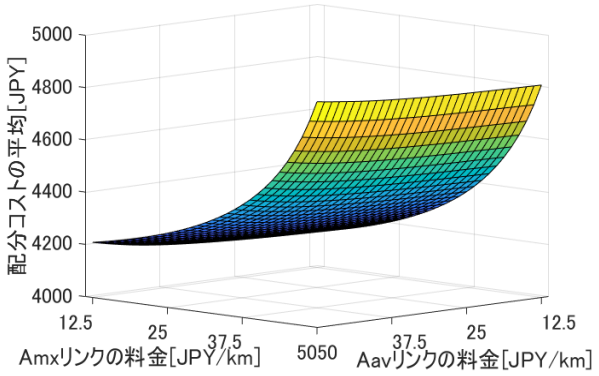


図-4　配分コストの平均(HV)

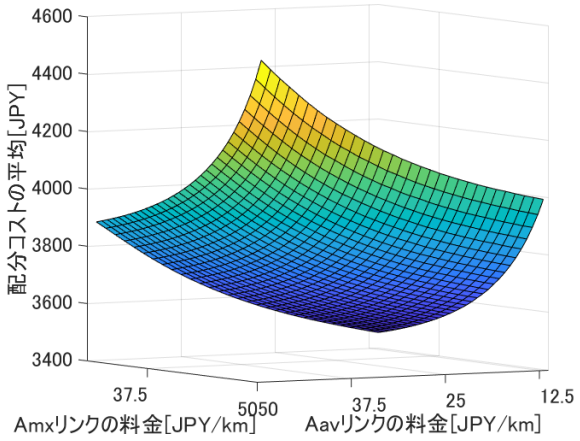


図-5　配分コストの平均(SAV)

図-3 の結果から，A_{mx}リンク，A_{av}リンクの通行料の減少に伴い，全車両の配分コストの平均は減少する傾向にあることが示された．A_{mx}リンク，A_{av}リンクの通行料がともに 12.5[JPY/km]になるとき，配分コストの平均は最小となった．特にA_{mx}リンクの通行料を減少させるとA_{av}リンクの通行料を同じ割合で減少させるより配分コストの平均が減少する傾向が示された．**図-4** の結果から，A_{av}リンクの通行料金を減少させても HV の配分コストの平均にはほとんど影響を及ぼさないことが分かった．一方でA_{mx}リンクの通行料の減少に伴い，HV の配分コストの平均は大幅に減少する傾向が示された．

また**図-5** の結果から，A_{mx}リンク，A_{av}リンクの通行料の減少に伴い SAV の配分コストの平均が減少する傾向が示された．

(4)　VOT_{av} の変化に伴う配分コストと交通需要の変化

本節ではVOT_{av} の変化に伴う HV，SAV の配分コストの平均の変化を図-6 に示す．またVOT_{av} の変化に伴う HV，SAV の交通需要の変化を**図-7** に示す．**図-6** の結果から，VOT_{av} の減少に伴い，HV，

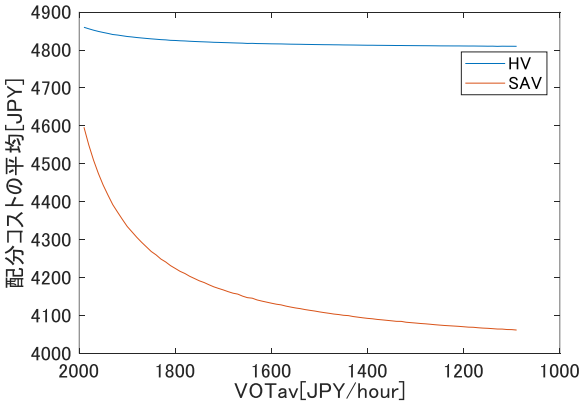


図-6　配分コストの平均(HV,SAV)

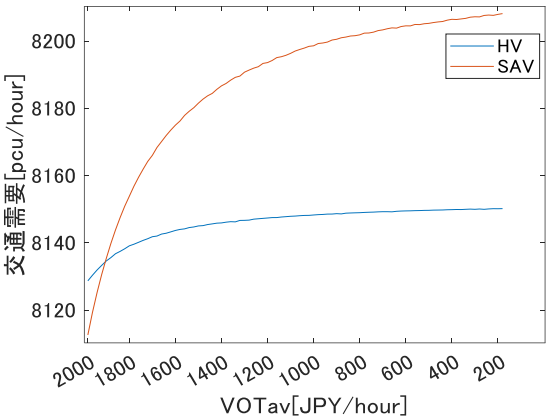


図-7　交通需要(HV,SAV)

SAV の配分コストの平均が減少する傾向が示された．特に SAV の配分コストの平均は HV に比べ，急激に減少することが明らかになった．また**図-7** の結果から，VOT_{av} の減少に伴い HV，SAV の交通需要が増加する傾向が示された．特に SAV の交通需要は HV に比べ，急激に増加することが明らかになった．

4.　まとめ

本研究では，レベル 4 の準自動運転車(SAV)と従来の手動運転車(HV)が混在する状況を想定した上でリンクの種類によって変化する，先行車の挙動に対する追従車の反応時間を考慮した交通容量と，各リンク上での運転モードによって異なる値をとる時間価値を考慮した需要変動型の確率的利用者均衡配分モデルを提案した．

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いて数値計算を行った．本研究では Wang et al[4] と異なり，3 種類のリンクを設定し，SAV の運転挙動をリンクごとに切り替えられるものとした．また，SAV と HV の混在流を考慮した交通容量によってリンクコスト関数のヘシアンが

非対称になるため，変分不等式問題として交通量配分問題を定式化した．

本研究の配分問題を均衡制約と持つネットワークデザイン問題を定式化した場合，反復的なアルゴリズムを用いるとネットワークデザイン問題は局所解となってしまう．今後は局所解を回避するために，非線形項を区分線形化するアルゴリズムを用いて大域的最適化を行うことを課題としたい．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21H01446 の助成を受けたものです．

参考文献

1) 官民 ITS 構想・ロードマップ 2020　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
2) 国土交通省:自動運転の実現に向けた国土交通省の取り組み　参考資料
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, 101855.
4) 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. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 125, 102952.
5) Wang, J., Peeta, S., & He, X. (2019). 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.
6) Nguyen, S., & Dupuis, C. (1984). An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs. Transportation Science, 18(2), 185-202.
7) 栗原脩斗，　峪龍一，内田賢悦:高速道路上の完全自動運転化を前提とする確率的時間価値の異質性を考慮した最適通行料金モデル，第 66 回土木計画学研究発表会
8) 新田翔，峪龍一，内田賢悦: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，第 62 回土木計画学研究発表会・講演集，2020.
9) 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.

(Received?)

TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL WITH VARIABLE DEMAND FOR MIXED FLOW OF SEMI-AUTONOMOUS AND MANUALLY DRIVEN VEHICLES

Kyoichi TAGO, Shuto KURIHARA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

I propose a multi-class traffic assignment model with variable demand for a situation in which semi-autonomous vehicles (SAV) and conventional manually driven vehicles (HV), which can drive automatically only on certain road links, are mixed.

The road network is assumed to consist of (i) links that can be used by both SAVs and HVs driven by autonomous vehicles, (ii) links that can be used only by SAVs driven by autonomous vehicles, and (iii) links that can be used by SAVs and HVs driven by manually driven vehicles. Since SAV drivers have different time values depending on the type of link they travel, SAV and HV drivers may have different utilities even when they travel the same route. Finally, numerical simulations are performed on the test network to confirm the behavior of the proposed model.