

自動運転車と手動運転車の混雑への非対称性と 経路選択の違いを考慮した交通均衡配分

五藤 大貴¹・三輪 富生²・森川 高行³

¹ 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: goto.daiki@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

² 正会員 名古屋大学准教授 未来材料・システム研究所

E-mail: miwa@nagoya-u.jp

³ 正会員 名古屋大学教授 未来社会創造機構

自動運転車は、反応速度に優れ、車車間通信や詳細な交通情報の把握が可能であるため、スムーズな交通を実現させ、道路容量を増加させる可能性がある。また自動運転は運転を行う必要がなく、ドライバーの時間価値も小さくなる。これらから、自動・手動運転車は道路ネットワークへの影響が異なり、経路の選択傾向も異なると考えられる。本研究では、自動・手動運転車のこれらの違いに着目し、混雑への影響の非対称性と経路選択の違いを考慮した交通均衡配分を行う。Wang ら (2019)を参考に、自動運転車は確定的利用者均衡に基づいた配分を行い、手動運転車は交通情報の不確実性と経路間の相関を考慮した CNL モデルに従った経路選択を行うと仮定している。テストネットワークへの適用から、混雑の非対称性を考慮しない場合は配分結果にバイアスが生じることが示された。

Key Words: *traffic equilibrium assignment, cross nested logit model, automated vehicles*

1. はじめに

近年、日本経済を牽引する自動車業界では「CASE」と呼ばれる世界的な技術の変革が起きようとしている。CASE とは Connected (つながる車), Autonomous (自動運転), Shared (共有化), Electric (電動化) の頭文字をとったものである¹⁾。CASE は 2016 年に独ダイムラーがパリモーターショーでの中長期戦略の中で提唱した造語であり、「自動車メーカーがただ製造するだけにとどまらず、モビリティのサービスプロバイダへと変わる」という戦略を示している。これにより、従来の完成車メーカーや部品メーカーだけでなく、巨大 IT 企業などの様々な企業が技術開発を加速させている。そして、CASE の一角である自動運転は、各国で自動運転車の実証実験が実施され、市場規模もレベル 3 以上の自動運転車は 2040 年には 4412 万台規模に成長することが見込まれている²⁾。

我が国では、自動運転の早期実現に向けて官民一体となって取り組んできた結果、世界で初めて自動運転レベル 3 の型式指定を取得した自動運転車 (条件付自動運転車) の市場化が実現されている。また、様々な地域で、

高齢者等の移動手段として限定領域下での無人自動運転移動サービスの取り組みがすすめられており、普及を促進する段階に移りつつある³⁾。

自動運転車は、いくつかの点で手動運転車と異なるため、将来の人々の移動を大きく変化させ、道路交通量も変化する可能性がある。Shladover ら⁴⁾は、協調アダプティブクルーズコントロール (CACC) が搭載された車両が道路に 50% や 90% 存在する時、各レーンの交通容量をそれぞれ約 20%、95% 増加させるとしている。また Tientrakool ら⁵⁾は、すべての車両がセンサーと車車間通信の両方を使用している場合は高速道路の容量は約 3.7 倍に増加するとしている。また Vanden ら⁶⁾は、自動運転車ユーザーは車内の時間が運転以外の他の活動に費やすことができるため、移動時間の価値 (VOT) が低下する可能性があるとして指摘している。その他にも、Fagnant and Kockelman⁷⁾は、車の衝突の主要因の約 90% が人であり、また重大事故の 40% 以上が飲酒、薬物等の人間の過失に起因していることを指摘し、自動運転車はそれらを減らすことができるとしている。さらに、自動運転が若年層や高齢者、障がい者にモビリティを提供し、新しい交通需要を生み出す可能性があるとしている。

本研究では、自動運転車が普及する将来の交通需要を予測する方法が、交通計画において必要との考えのもと、このような自動運転車と手動運転車の特性の違いを考慮した交通量配分を行い、得られた知見を示す。表-1に示すように、自動運転車は、手動運転車と比べて時間価値が低く、交通情報に不確実性がなく確定的な経路選択を行い、手動運転車と置き換わることで混雑を緩和する効果があるとする。一方、手動運転車は、自動運転車より時間価値が高く、交通情報の不確実性から確率的な経路選択を行い、自動運転車のような混雑緩和の効果がないとした。自動運転車と手動運転車が混在した状況下での交通量配分法に関する研究には、Wangら⁸⁾の研究があげられるが、より詳細な分析が必要である。そこで本研究では、Wangらのモデルを整理しつつ、自動運転車と手動運転車の道路ネットワークに与える影響の差異が交通量配分結果にどのように影響するかを分析する。

表-1 自動運転車と手動運転車の比較

	自動運転車	手動運転車
時間価値	低い	高い
経路選択	確定的	確率的
混雑緩和	あり	なし

2. 自動運転車と手動運転車の混在を考慮した交通量配分モデル

ここでは、Wangら⁸⁾の交通量配分法を説明する。表-1で示したように、自動運転車の経路選択行動は確定的利用者均衡配分により表現できるとする。また、手動運転車の経路選択行動はCNL (Cross Nested Logit) モデルで表現できるとする。このとき、求める交通量配分結果は変分不等式を解くことで得られる。なお、これ以降では、簡単のため手動運転車をHDV (Human-Driven Vehicle)、自動運転車をCAV (Connected and Autonomous Vehicle)と呼ぶ。また、変数等で自動運転車を区別するために手動運転車には添え字としてH、自動運転車にはAを割り当てる、Zは車種を表し $Z \in \{H, A\}$ である。例えば、HDVとCAVのODペア集合は W_H, W_A と表記し、ODペア集合は W_Z である。

CNLモデルの構造は図-1のように表すことができる。ネスト構造は、道路ネットワークを構成するリンクによって定義される。このとき、HDVのODペア集合 W_H に含まれるODペアwにおけるネストmの選択確率 $p^w(m)$ 、ネストmを選択したという条件のもとで経路kを選択する条件付き確率 $p^w(k|m)$ 、及び経路kの選択確率 $p^w(k)$ は式(1)のように表現できる⁹⁾。

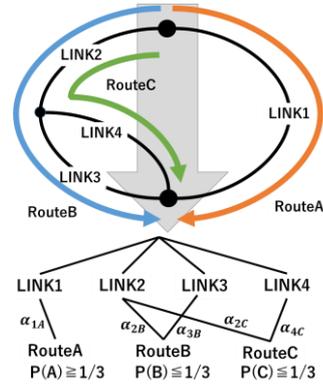


図-1 適用するCNLの構造

$$p^w(m) = \frac{(\sum_{k \in R_H^w} [\alpha_{m,k}^w \exp(-\theta c_{k,H}^w)]^{1/\mu})}{\sum_{b \in \Gamma_H} (\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{b,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu})^\mu} \quad (1.a)$$

$$p^w(k|m) = \frac{(\alpha_{m,k}^w \exp(-\theta c_{k,H}^w))^{1/\mu}}{\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{m,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu}} \quad (1.b)$$

$$p^w(k) = \sum_m P(m) P(k|m) \quad (1.c)$$

$$\alpha_{m,k}^w = \frac{l_m}{l_k} \cdot \delta_{m,k}^w \quad (1.d)$$

ここに、ODペアwにおいて、 R_H^w はHDVが利用可能な経路集合、 $\alpha_{m,k}^w$ は経路kのネストmに対するアロケーションパラメータ、 $c_{k,H}^w$ は経路kのHDVが経験するコストである。また、 Γ_H はHDVが利用できるリンク集合、 θ は経路選択に関する感度パラメータ、 μ はネスティングパラメータ、 l_m はリンクmの長さ、 l_k^w はODペアwの経路kの長さであり、 $\delta_{m,k}^w$ はODペアwの経路kにリンクaが含まれるとき1、そうでないとき0の変数である。

なお、 $0 < \mu \leq 1$ であり、 $\mu = 1$ の時CNLモデルはMNLモデルと等価になる。また、 $\mu \rightarrow 0$ の場合は上位レベル(リンク)では確率的に、下位(経路)レベルでは確定的な経路選択に近づく。

Prashker and Bekhor¹⁰⁾はCNLモデルを経路選択モデルとした確率的利用者均衡配分モデルを示した。しかし、ある交通流の走行時間に対して手動運転車の増加が及ぼす影響と、自動運転車の増加が及ぼす影響が相互に等しくない(つまり、リンクコスト関数が非対称である)場合は、リンクコスト関数に式(2)で示される関係があり、均衡状態を導く等価な数理最適化問題が存在しない¹¹⁾。

$$\frac{\partial \bar{t}_a(v_{a,H}, v_{a,A})}{\partial v_{a,H}} \neq \frac{\partial \bar{t}_a(v_{a,H}, v_{a,A})}{\partial v_{a,A}} \quad (2)$$

ここに、 $v_{a,H}$ と $v_{a,A}$ は、それぞれリンクaのHDV及びCAVの交通量、 $\bar{t}_a(v_{a,H}, v_{a,A})$ はリンクaの旅行時間である。それゆえ、交通量配分に用いられることの多いFrank-Wolf法¹²⁾やEvans法¹³⁾は適応出来ず、均衡条件は相補性問題で書かれるか、あるいは変分不等式や不動点問

題によらなければならない¹¹⁾。以降では、経路交通量の変数とした変分不等式を定義する。

まず、HDV の経路選択確率を CNL モデルで表現する場合、その均衡条件下では、ODペア w の経路 k の一般化コストは式(3)のようになる⁸⁾。

$$C_{k,H}^w = c_{k,H}^w - \frac{\mu}{\theta} H_{k,H}^w + \frac{\mu}{\theta} \ln \left(\frac{f_{k,H}^w}{q_H^w} \right) \quad (3.a)$$

ここで、

$$H_{k,H}^w = \ln \left[\sum_{m \in \Gamma_H} (\alpha_{m,l}^w)^{\frac{1}{\mu}} \left(\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{m,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu} \right)^{\mu-1} \right] \quad (3.b)$$

また、OD ペア w において、 $f_{k,H}^w$ は HDV の経路 k の交通量、 q_H^w は HDV の OD 間交通量である。均衡状態では、各 OD ペアで、HDV の全経路の一般化コスト $C_{k,H}^w$ が等しくなるような経路交通量 $f_{k,H}^{w*}$ が実現する。この条件は式(4)のように表現できる。

$$C_{k,H}^w(\mathbf{f}_H^*) = \tau_H^w, \forall w \in W_H, \forall k \in R_H^w \quad (4.a)$$

ここに、 \mathbf{f}_H^* は $f_{k,H}^{w*}$ からなるベクトルであり、式(4b)である。

$$\mathbf{f}_H^* = \{f_{k,H}^{w*}, \forall w \in W_H, \forall k \in R_H^w\} \\ \mathbf{f}_H^* \in \Omega_{f_H} = \{\mathbf{f} | \Lambda_H \mathbf{f}_H = \mathbf{q}_H, \mathbf{f}_H \geq 0\} \quad (4.b)$$

また、 Ω_{f_H} は \mathbf{f}_H の実行可能領域、 Λ_H は HDV の OD ペアと経路交通量の接続行列、 \mathbf{q}_H は OD 交通量のベクトルである。このとき、 τ_H^w は \mathbf{f}_H^* によって与えられる均衡状態での一般化コストである。

Wie ら¹⁴⁾及び Nagurney¹⁵⁾に従って、式(4)の問題は以下の変分不等式問題によって表現できる。

$$\sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} C_{k,H}^w (f_{k,H}^w - f_{k,H}^{w*}) \geq 0 \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_H^* \in \Omega_{f_H}$ である。

続いて、HDV と CAV が混合するマルチクラスの交通量配分モデルについて説明する。リンク上では HDV と CAV は同一の旅行時間となるが、旅行時間はそれらの構成比によって変化すると仮定する。この場合のリンクコスト関数は式(6)を表現する。

$$\bar{t}_a(v_{a,H}, v_{a,A}) = \frac{l_a}{s_a} \left[1 + \alpha \left(\frac{v_{a,H} + v_{a,A}}{Q_a} \right)^\beta \right], \forall a \in \Gamma_H \quad (6)$$

ここに、 s_a はリンク a の自由走行速度である。 α および β は BPR 関数のパラメータであり、本研究では Wang ら⁸⁾に従って、それぞれ 1 と 4 とした。また、 Q_a は交通容量であり、Levin and Boyles¹⁶⁾を参考に、CAV の高い反応速度による交通容量増加を考慮して、以下のように計算する。

$$Q_a = \frac{1}{\frac{v_{a,H}}{v_{a,H} + v_{a,A}} \frac{1}{Q_{a,H}} + \frac{v_{a,A}}{v_{a,H} + v_{a,A}} \frac{1}{Q_{a,A}}} \quad (7)$$

ここに、 $Q_{a,H}, Q_{a,A}$ は交通流が HDV もしくは CAV のみで構成される場合のリンク a の交通容量である。また、その比を非対称性のパラメータ AS とし、式(8)のように定義する。

$$Q_{a,A} = AS \cdot Q_{a,H} \quad (8)$$

また、前述のように、HDV と CAV の時間価値が異なるとし、車種 z のリンクコストを式(9)のように計算する。

$$t_{a,z} = \bar{t}_a(v_{a,H}, v_{a,A}) \cdot VOT_z \quad (9)$$

続いて、CAV の均衡状態を定義する。CAV は HDV と異なり、車両間通信やその他の通信により、CAV が交通状況を完全に把握しているとし、最小移動コストの経路を常に選択できるとする。このとき、均衡状態は同一 OD ではコストが等しくなり、自動運転ユーザー内では確定的利用者配分となる。またその時の CAV の一般化コストは式(10)の条件 (UE 条件) を満たす必要がある。

$$C_{k,A}^w = c_{k,A}^w = \begin{cases} \tau_A^w, & \text{if } f_{k,A}^w > 0 \\ \geq \tau_A^w, & \text{if } f_{k,A}^w = 0 \end{cases} \quad (10) \\ \forall k \in R_A^w, \forall w \in W_A$$

ここで、

$$\mathbf{f}_A^* \in \Omega_{f_A} = \{\mathbf{f} | \Lambda_A \mathbf{f}_A = \mathbf{q}_A, \mathbf{f}_A \geq 0\}$$

式(4)、式(10)に示された条件より、経路交通量 $(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*)$ が、式(11)の変分不等式問題を満たす場合にのみ、HDV は CNL モデルであらわされる確率的利用者均衡状態、CAV は確定的利用者均衡状態となる⁸⁾。

$$\sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} C_{k,H}^w(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*) (f_{k,H}^w - f_{k,H}^{w*}) \\ + \sum_{w \in W_A} \sum_{k \in R_A^w} C_{k,A}^w(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*) (f_{k,A}^w - f_{k,A}^{w*}) \geq 0 \quad (11)$$

ここで、

$$[\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_A], [\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*] \in \Omega_f \\ = \{[\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_A] | \Lambda_H \mathbf{f}_H = \mathbf{q}_H, \Lambda_A \mathbf{f}_A = \mathbf{q}_A, \mathbf{f}_H \geq 0, \mathbf{f}_A \geq 0\}$$

なお、式(11)は少なくとも一つの解を有し、また非対称性に起因する複数の局所的な解を持つ場合がある¹⁷⁾。

3. 配分アルゴリズム

本研究では式(11)の変分不等式問題を解くアルゴリズムに Hunag and Lam¹⁸⁾の Projected Route-Swapping (PRS) アルゴリズム及び Wang ら⁸⁾の RSRS-MSRA (Revised Smith's

route-Swapping-Modified the Self-Regulated Average) アルゴリズムを用いる。PRS アルゴリズムは、最小コストを持つ経路に他のすべての経路が交通量を移すものであり、Huang and Lam¹⁹⁾や Szeto and Lo²⁰⁾, Ramadurai and Ukkausuri²¹⁾といった変分不動式問題を用いた交通量配分モデルに使用されてきた。PRS アルゴリズムの主なフローは以下の通りである。

Step1 : 初期経路交通量 $(\mathbf{f}_{n,H}, \mathbf{f}_{n,A})$ を与え, $n = 1$ とする。

Step2 : 経路交通量 $\mathbf{f}_{n,H}, \mathbf{f}_{n,A}$ に応じて一般化経路コストの更新する。また CAV と HDV の両方について、各 OD ペアの最小一般化コストとそれに対応する経路を取得する。

$$C_{z,min}^w = \min\{C_{k,z}^w(\mathbf{f}_{n,H}, \mathbf{f}_{n,A}) : k \in R_z^w\},$$

$$\tilde{R}_z^w = \{k | C_{k,z}^w(n) = C_{z,min}^w : k \in R_z^w\}, z \in \{HDV, CAV\}$$

ここに、 $C_{z,min}^w$ は OD ペア w における車種 z の最小一般化コスト、 \tilde{R}_z^w は各 OD ペアにおいて最小コストを持つ経路の集合である。

Step3 : 経路交通量の更新する。CAV と HDV の両方について、 $n + 1$ の経路交通量 $\mathbf{f}_{n+1,H}, \mathbf{f}_{n+1,A}$ を式(12)により得る。

$$f_{k,z}^w(n+1) = f_{k,z}^w(n) - \beta_n f_{k,z}^w(n) [C_{k,z}^w - C_{z,min}^w],$$

for $k \in R_z^w \setminus \tilde{R}_z^w, z \in \{HDV, CAV\}$

$$f_{k,z}^w(n+1) = f_{k,z}^w(n) + \frac{\sum_{i \in R_z^w \setminus \tilde{R}_z^w} \beta_n f_{i,z}^w(n) [C_{i,z}^w - C_{z,min}^w]}{|\tilde{R}_z^w|},$$

for $k \in \tilde{R}_z^w, z \in \{HDV, CAV\}$

ここに、 $k \in R_z^w \setminus \tilde{R}_z^w$ は最小一般化コストを持つ経路集合 \tilde{R}_z^w に含まれない経路であり、 β_n はステップサイズを表すパラメータである。

Step4 : 新たな経路交通量 $\mathbf{f}_{n+1,H}, \mathbf{f}_{n+1,A}$ が収束条件を満たしていれば終了。収束条件は例えば、経路交通量 \mathbf{f}_{n+1} と \mathbf{f}_n が一定以下の差である等が考えられる。満たしていなければ $n = n + 1$ として Step2 へ。

この PRS アルゴリズムでは、最小一般化コストを持つ経路に他のすべての経路から交通量を移すため、最小一般化コストの経路交通量が一時的に過大になる可能性がある。このため、経路交通量 \mathbf{f} が解に近い場合ほど、収束の速度が下がるという欠点がある。

Wang ら⁸⁾は、Smith²²⁾が開発した Route-Swapping (RS) モデルを HDV と CAV のマルチクラスの交通に適用できるよう拡張し、PRS アルゴリズムより早く収束する RSRS アルゴリズムを提案した。RSRS アルゴリズムは、最小コストを持つ経路だけではなく、最小コストに近いコストを持つ経路にも交通量を移す点で PRS と異なる。RSRS アルゴリズムの主なフローは以下の通りである。

Step1 : OD 交通量を均一に割り当て、初期経路交通量 $(\mathbf{f}_{n,H}, \mathbf{f}_{n,A})$ とする。 $n = 1$ とする。

Step2 : 降下方向を検出する $\Phi(\mathbf{f}_n)$ を計算する。

$$\Phi_{k,H}^w(\mathbf{f}_n) = \sum_{g \in R_H^w} \left[f_{g,H}^w(n) (C_{g,H}^w(\mathbf{f}_n) - C_{k,H}^w(\mathbf{f}_n))_+ - f_{k,H}^w(n) (C_{k,H}^w(\mathbf{f}_n) - C_{g,H}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right]$$

$$\Phi_{k,A}^w(\mathbf{f}_n) = \sum_{g \in R_A^w} \left[f_{g,A}^w(n) (C_{g,A}^w(\mathbf{f}_n) - C_{k,A}^w(\mathbf{f}_n))_+ - f_{k,A}^w(n) (C_{k,A}^w(\mathbf{f}_n) - C_{g,A}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right]$$

ここに、 $\Phi_{k,H}^w(\mathbf{f}_n)$ と $\Phi_{k,A}^w(\mathbf{f}_n)$ はいずれも $\Phi(\mathbf{f}_n)$ の要素であり、 $(X)_+ = X > 0$ のとき $(X)_+ = X$ 、そうでなければ $(X)_+ = 0$ である。

Step3 : Step2 で計算された $\Phi(\mathbf{f}_n)$ によって、以下のように経路交通量の更新する。

$$\mathbf{f}_{n+1} = \mathbf{f}_n + \beta_n \Phi(\mathbf{f}_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{n,H} \\ \mathbf{f}_{n,A} \end{bmatrix} + \beta_n \begin{bmatrix} \Phi_H(\mathbf{f}_n) \\ \Phi_A(\mathbf{f}_n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Step4 : 新たな経路交通量 \mathbf{f}_{n+1} が収束条件を満たしていれば終了。満たしていなければ $n = n + 1$ として Step2 へ。

さらに、Wang ら⁸⁾は、Liu ら²³⁾が開発した the self-regulated average method (SRA 法) を修正し、RSRS-MSRA アルゴリズムを提案している。SPA 法は現ステップでの反復計算と前ステップでの反復計算の両方の情報を使用し、ステップサイズ β_n を以下のように修正する。

$$\beta_n = \frac{1}{h_n} \cdot \frac{1}{\chi_n} \quad (13.a)$$

ここで、

$$\chi_n = \begin{cases} 2; & \text{if } n = 1 \\ \chi_{n-1} + Y_1; & \text{if } \Phi(\mathbf{f}_n) \geq \Phi(\mathbf{f}_{n-1}) \text{ and } n \geq 2 \\ \chi_{n-1} + Y_2; & \text{if } \Phi(\mathbf{f}_n) \leq \Phi(\mathbf{f}_{n-1}) \text{ and } n \geq 2 \end{cases} \quad (13.b)$$

$$h_n = \max \left(h_{i,z}^w(n) | h_{i,z}^w(n) = \sum_{j \in R_z^w \setminus i} (C_{g,z}^w(\mathbf{f}_n) - C_{i,z}^w(\mathbf{f}_n))_+, \right.$$

$$\left. i \in R_z^w, \forall w \in W_z, \forall w \in \{HDV, CAV\} \right)$$

Y_1 と Y_2 は事前に決定する値で $Y_1 > 1; Y_2 \in (0,1)$ であるとされている⁸⁾。

また、収束の度合いを示す関数を、Wang ら⁸⁾は式(14)のように定義した。

$$G = \frac{b}{a} \quad (14.a)$$

ここで

$$a = \sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} f_{k,H}^w C_{k,H}^w + \sum_{w \in W_A} \sum_{k \in R_A^w} f_{k,A}^w C_{k,A}^w \quad (14.b)$$

$$b = \sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} f_{k,H}^w (C_{k,H}^w - C_{min,H}^w) + \sum_{w \in W_A} \sum_{k \in R_A^w} f_{k,A}^w (C_{k,A}^w - C_{min,A}^w) \quad (14.c)$$

HDV の一般化コスト $C_{k,H}^w$ は、式(3.a)の第2、および第3項によりの負値をとる可能性があり、その場合は G がマイ

ナスになってしまう。また a が0に十分に近づくと G が無限に発散してしまう。そのため、本研究では G の分子 a を以下のように定義した。

$$a = \left| \sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} f_{k,H}^w C_{k,H}^w \right| + \left| \sum_{w \in W_A} \sum_{k \in R_A^w} f_{k,A}^w C_{k,A}^w \right|$$

4. 分析と考察

(1) テストネットワークと諸条件

本研究の分析に用いる基本ネットワークを図-2に示す。長さが1kmのリンクで構成される格子状ネットワークである。これらのリンクはHDV及びCAVの双方で利用可能であるとする。また、非対称性のパラメータ AS は2とし、交通流がHDVもしくはCAVのみで構成される場合の交通容量である $Q_{a,H}, Q_{a,A}$ は、それぞれ25台と50台とした。また、自由走行速度は40km/hとする。ODは左上のノードを起点、右下のノードを終点とする。OD間交通量は、HDV、CAVともに50台とする（CAVシェア50%）。またHDV、CAVともに遠回りしない全経路が利用可能である。時間価値は、 $VOT_H = 1.0, VOT_A = 0.5$ とし、HDVの経路選択に関する感度パラメータ θ 及びネスティングパラメータ μ はいずれも0.5に設定した。

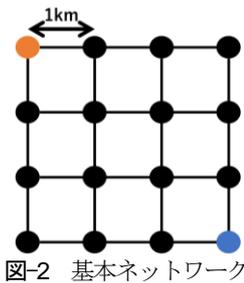


図-2 基本ネットワーク

(2) 基本ネットワークにおける配分結果の分析

ここではRSRS-MSRAアルゴリズムを用いた。ステップサイズ χ_n を決定する $Y = \{Y_1, Y_2\}$ はWang⁸⁾を参考に $Y = \{2, 0.01\}$ とした。また収束条件を $G \leq 1.0 \times 10^{-6}$ とした。配分結果を図-3に示す。

図-3の上段が非対称性を考慮する場合（ $AS = 2$ ）、下段が考慮しない場合（ $AS = 1$ ）の結果である。各图中的の数值は各項目のタイトルの通りであるが、「c. 合計交通量」は「a. CAV交通量」と「b. HDV交通量」のリンク交通量を足し合わせた交通量である。また、「d. 合成交通容量」は、式(6)の Q_a であり、上段の非対称性を考慮する場合は、式(7), (8)から計算される値である。一方、下段の非対称性を考慮しない場合はHDVのみの場合の交通容量と一致する。また、「e. 混雑度」は、「d. 合成交通容量」に対する「c. 合計交通量」の比であり、BPR関数である式(6)のカッコ内の混雑度である。また、图中的の色の凡例を図-4に示す。

	a. HDV交通量	b. CAV交通量	c. 合計交通量	e. 混雑度
凡例	25台~	25台~	50台~	1~
	12.5台	12.5台	25台	0.5
	0台	0台	0台	0

図-4 配分結果図の凡例

図-3.eより、非対称性を考慮したことで、ネットワーク全体の混雑度が低減されることが分かる。各リンクのCAVの配分量も非対称性を考慮する場合としない場合ではやや異なり、HDVの交通量がやや少ない経路を多く走行する。これにより、非対称性を考慮しない場合では、計画段階で交通量を誤る可能性がある。なお、HDVの交通量が外縁部のリンクでやや少なくなる理由

	a. HDV交通量	b. CAV交通量	c. 合計交通量	d. 合成交通容量	e. 混雑度
非対称性考慮					
非対称性非考慮					

図-3 基本ネットワーク配分結果

は、外縁部は多くの経路が重ならないためであると考えられる。

(3) バイパスネットワークにおける配分結果の分析

基本ネットワークにバイパスを追加した場合の配分を行う。図-5の黄色のリンクが追加されたバイパス道路を表す。黄色のバイパスリンクはHDV及びCAVの双方において利用可能であるとする。バイパスリンクの非対称性のパラメータASも2とし、HDV及びCAVのみの場合の交通容量 $Q_{a,H}$, $Q_{a,A}$ は、それぞれ50台と100台とし、自由走行速度は80km/hとする。また基本ネットワークと同様の条件でRSRSアルゴリズムを用いた。配分結果を図-6に示す。バイパスリンクの配分結果は、各図の下部にある横長の色で示している。

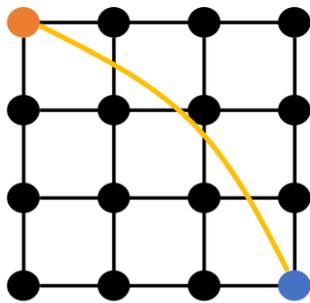


図-5 バイパスネットワーク

非対称性を考慮する場合としない場合で、基本ネットワーク上の交通量はほぼ同じであるが、バイパスの混雑度が大きく異なる結果となった。これは、CAVの交通量が全てバイパスに流れたためである。非対称性を考慮した場合の混雑度は交通容量の半分程度(55.7台/90.8台)に対して、考慮しない場合では容量を超える(55.6台/50

台)と算出され、混雑度を過剰に見積もってしまう。そのため、サービスレベルの高い道路はCAVが多く通行するため、非対称性を考慮しない場合は、必要以上の交通容量を設定しないように注意が必要である。

HDVとCAVの、バイパス経路のコストとその他の経路の平均コストを表-2に示す。CAVがバイパスに多く配分されるのは、CAVは最短経路を常に把握しているためである。一方で、HDVは明らかな最短経路が存在している場合でも、情報の不確実性を考慮した確率的な経路選択により、それ以外の経路にも配分される。このため、配分結果においてはバイパスリンクをCAVが占有するような状況が起こる。その他のリンクでも、最短経路があればCAVは確定的に利用するため混雑が増加し、その結果HDVはさらに多様な経路へとばらつくことになる。

表-2 バイパスネットワークの詳細

		交通量	時間コスト	総コスト
HDV	バイパス	5.5	0.061	-2.17
	その他平均	2.2	0.185	-2.17
CAV	バイパス	50.0	0.031	0.031
	その他平均	0.0	0.092	0.092

(3) 幹線道路ネットワークにおける配分結果の分析

基本ネットワークの一部のリンクを幹線道路とした場合の配分を行う。図-7に黄色で示した外延部のリンクをHDV及びCAVの双方に利用可能な幹線道路とする。幹線道路リンクの非対称性のパラメータASは2、HDV及びCAVのみの場合の交通容量 $Q_{a,H}$, $Q_{a,A}$ は、それぞれ40台と80台とし、自由走行速度は60km/hとする。また、

	a. HDV交通量	b. CAV交通量	c. 合計交通量	d. 合成交通容量	e. 混雑度
非対称性を考慮	 5.5	 50.0	 55.5	 90.9	 0.61
非対称性を考慮しない	 5.4	 50.0	 55.4	 50.0	 1.11

図-6 バイパスネットワーク配分結果

なお、 $e^2 = 1$ の場合は、 $\beta_n^{PRS} = e^1 \times \frac{1}{n+1}$ であり、 $e^2 = 10^5$ までは、 $\beta_n^{PRS} = e^1$ と定数になる。計算に用いたネットワークでは、収束計算を通じてステップサイズが定数 ($e^2 = 10^5$) の場合が、計算効率に優れた結果となった。さらに、 $e^1 = 0.2$ とし、 $n = 3 \times 10^5$ まで計算した場合においても、表-4 に示すようにステップサイズが定数である場合が最も収束した結果となった。

表-4 $e^1 = 0.2$ とし、 $n = 3 \times 10^5$ まで計算した場合の G 値

$e^1 \backslash e^2$	0.5 $\times 10^5$	1.0 $\times 10^5$	1.5 $\times 10^5$	3.0 $\times 10^5$
0.2	1.96E-09	1.62E-10	2.94E-11	1.37E-12

b) RSRS-MSRA アルゴリズム

RSRS-MSRA アルゴリズムのステップサイズ χ_n を決定する $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2\}$ を変化させた時の G 値が表-5 である。また、表-5 中の表記法は表-4 と同様である。表-5 から RSRS-MSRA アルゴリズムは幅広い \mathbf{Y} においてイタレーション回数 n が 2 万以下で収束し、安定して計算効率が良いため、パラメータの調整が容易であると言える。また、既往研究では $Y_1 > 1$ であるとされていたが⁸⁾、ある程度小さな値の場合でも収束することが確認された。

表-5 RSRS-MSRA アルゴリズムの結果

$Y_1 \backslash Y_2$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}
001	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.1	×	○	○	○	○	○
	(8.0E-05)	13269	12591	12569	12585	12598
2	×	○	○	○	○	○
	(1.1E-04)	13413	12828	12835	12835	12835
10	×	○	○	○	○	○
	(1.2E-04)	14096	13095	13085	13082	13081
100	×	○	○	○	○	○
	(4.2E-04)	28967	19920	19890	19881	19881
500	×	×	○	○	○	○
	(1.2E-03)	(6.1E-06)	67998	67547	67542	67542
1000	×	×	×	×	×	×
	(1.8E-03)	(1.0E-04)	(1.3E-05)	(1.3E-05)	(1.3E-05)	(1.3E-05)

5. 結論

本研究では CAV と HDV の経路選択、時間価値、混雑への影響の違いを考慮した交通均衡配分を行った。CAV は完全情報を持つと仮定し、確定的利用者均衡に基づく交通量配分を行い、HDV は交通情報の不確実性のために確率的な経路選択を行うと仮定し、それを

CNL モデルで表現した確率的利用者均衡配分として交通量を配分した。また CAV は時間価値が低く、混雑への影響が小さいとした。

特に着目した点は、CAV の混雑緩和効果（混雑への非対称性）である。リンクコスト関数において混雑への非対称性を考慮しない場合は、配分結果にバイアスが生じることが明らかになった。特に、非対称性を考慮しない場合は混雑度を過大に見積もり、配分されるリンク交通量も異なる結果となった。バイパス道路の存在を想定したネットワークにおいても、バイパスリンクの混雑度を過剰に見積もる。また、ネットワーク内に幹線道路が走る場合は、リンク交通量及びその内訳に差異が生じることが分かった。よって、道路計画者は、自動運転時代への移行中の輸送計画において、ネットワークフローをより適切に見積もるには、混雑への非対称性を考慮すべきであると言える。

今後の課題としては、複数 OD への拡張や実ネットワーク等大規模ネットワークへの拡張が考えられる。また、本研究では遠回りしない全経路が利用可能とし経路を列挙したが、これらの拡張を踏まえると経路の列挙は計算コストの観点から好ましくなく、利用可能性の高い経路のみを選択し集合に追加する DSD (Disaggregate simplicial decomposition)²⁴⁾ アルゴリズム等を応用する必要がある。また、本研究では非対称性のパラメータを 2 とし、HDV と CAV の OD 交通量の比であらわされる自動運転車普及率を一定としたが、自動運転時代への移行中においてネットワークフローをより適切に見積もるには、自動運転車の性能向上や普及率の違いによって生じる変化を考慮に入れる必要がある。最後に、本研究で用いた変分不等式問題は、解が一意でない場合がある。より現実に取り得る解を得るため、適切なアルゴリズムやパラメータの選定や、現況の交通状況の把握、均衡解への推移を慎重に観察する必要がある。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 19H02260 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 太田信義：名古屋学院大学社会学編第 57 巻第 1 号，pp.197-236，2020.
- 2) Deloitte，<https://www2.deloitte.com/jp/ja/pages/manufacturing/articles/aut/development-trends-and-ip-issues-of-case.html>。（アクセス日：2021 年 9 月 24 日）
- 3) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT 総合戦略本部）：官民 ITS 構想・ロードマップ，pp.18，2021.
- 4) Shladover, S., Su, D., Lu, X., Y.: Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow Impacts of Cooperative Adaptive

- Cruise Control on Freeway Traffic Flow, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324(-1), 2012.
- 5) Tientrakool, P., Ho, Y. C., Maxemchuk, N. F.: Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance, 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 1-5, 2011.
 - 6) van den Berg, V, A. C., Verhoef, E. T.: Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.94, pp. 43-60, 2016.
 - 7) Fagnant, D. J., Kockelman, K.: Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.77, pp. 167-181, 2015.
 - 8) 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*, Vol.126, pp. 139-168, 2019.
 - 9) Vovsha, P. and Bekhor, S.: Link-Nested Logit Model of Route Choice: Overcoming Route Overlapping Problem, *Transportation Research Record*, Vol.1645, No.1, pp. 133-142, 1998.
 - 10) Prashker, J. N. and Bekhor, S.: Stochastic User-Equilibrium Formulations for Extended-Logit Assignment Models, *Transportation Research Record 1676 Paper*, pp. 145-152, 1999.
 - 11) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と分析-, pp.115, 丸善, 2000.
 - 12) Frank, M., Wolf, P.: An Algorithm for Quadratic Programming, *Naval Research Logistics Quarterly*, 3, pp.95-110, 1956.
 - 13) Evans, S.P.: Derivation and Analysis of Some Models for Combining Trip Distribution and Assignment, *Transportation Research*, Vol. 10(1), pp. 37-57, 1976.
 - 14) Wie, B. W., Tobin, R.L., Friesz, T. L., Bernstein, D.: A Discrete Time, Nested Cost Operator Approach to the Dynamic Network User Equilibrium Problem, *Transportation Science*, Vol.29, No.1, pp.79-92, 1995.
 - 15) Nagurney A.: A multiclass, multicriteria traffic network equilibrium model, *Math.Comput.Model.*, Vol.32, No.3, pp. 393-411, 2000.
 - 16) Levin, M. W., Boyles, S.D.: A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.62, pp. 103-116, 2016.
 - 17) Nagurney A.: *Network economics: a variational Inequality Approach*, Vol.10. Springer Science & Business Media, 2013.
 - 18) Huang H., Lam, W. H.: Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with queues, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.36, No.3, pp. 253-273, 2002.
 - 19) Huang H., Lam W. H.: A Multi-Class Dynamic User Equilibrium Model for Queuing Networks with Advanced Traveler Information Systems, *J.Math.Model.Algorithms*, Vol.2, No.4, pp. 349-377, 2003.
 - 20) Szeto W. Y., Lo, H. K.: DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT: PROPERTIES AND EXTENSIONS, *Transportmetrica*, Vol.2, No.1, pp. 31-52, 2006
 - 21) Ramadurai, G., Ukkusuri, S.: Dynamic User Equilibrium Model for Combined Activity-Travel Choices Using Activity-Travel Supernetwork Representation, *Networks and Spatial Economics*, Vol.10, No.2, pp. 273-292, 2010.
 - 22) Smith, M. J.: The Stability of a Dynamic Model of Traffic Assignment—An Application of a Method of Lyapunov, *Transportation Science*, Vol.18, No.3, pp. 245-252, 1984.
 - 23) Liu, H.X., He, X., He, B.: Method of Successive Weighted Averages (MSWA) and Self-Regulated Averaging Schemes for Solving Stochastic User Equilibrium Problem, *Networks and Spatial Economics*, Vol.9, No.4, pp. 485, 2007.
 - 24) Damberg, O., Lundgren, J. T., Patriksson, M.: An Algorithm for The Stochastic User Equilibrium Problem, *Transportation Research part B*, Vol. 30(2), pp. 115-131, 1996.

(Received October 1, 2021)

TRAFFIC EQUILIBRIUM ASSIGNMENT CONSIDERING ASYMMETRY TO CONGESTION AND DIFFERENCES IN ROUTE CHOICE BETWEEN AUTONOMOUS AND HUMAN-DRIVEN VEHICLES

Daiki GOTO, Tomio MIWA, Takayuki MORIKAWA