

# 動的車線課金による交通流の最適化

塩見 康博<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 立命館大学准教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)  
E-mail:shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

将来的なコネクティッド車両や自動走行車両の普及により、個別車両の挙動を制御することで交通流の全体最適を図ることが可能になると予想される。とりわけ、高速道路のボトルネックでは、車線利用率の偏りによる交通容量の低減が指摘されており、その是正による交通流を最適化する余地が十分存在すると考えられる。本研究では、最適化理論ベースで車線利用率を是正する動的車線課金システムを提案する。具体的には、観測される車線利用率曲線は、車線毎の密度に基づいて定義される効用に対し、利用者均衡の状態を反映したものと解釈する。その上で、効用関数の推定を行い、社会最適状態に相当する車線利用率を実現するための課金項を効用関数に導入することで、提案する動的車線システムを表現する。さらに、高速道路の単路部ボトルネックでの適用を念頭に、諸制約を考慮した事前の課金方法を提案し、シミュレーションベースでその効果を検証する。

**Key Words :** *dynamic toll lane, toll optimization, traffic flow,*

## 1. はじめに

日本の高速道路では、サグなど国土の地形的要因や、また、高速道路網の整備が不十分で複数ルートを選択ができないことにより、単路部をボトルネックとして発生する渋滞の割合が多い。例えば、NEXCO中日本(株)による統計では、渋滞原因の62%程度がサグやトンネルなど単路区間中の道路構造に起因することが明らかとなっている<sup>1)</sup>。

一般に、単路区間のボトルネックでは、交通量が多くなるにつれて、追い越し車線側に交通需要が集中することにより、車線合計としての交通容量に満たない交通需要で渋滞が発生することが知られている<sup>2), 3), 4)</sup>。その対策として、走行車線の利用維持を道路利用者と呼びかけることで、渋滞発生時交通量を改善する効果があることが報告されている<sup>5)</sup>。また、ボトルネック直前に付加車線を設置することで、車線利用率が改善し、ボトルネックの交通容量の増大に寄与するとの報告もなされている<sup>2)</sup>。

これらの車線誘導は将来的なコネクティッド車両や自動走行車両の普及により、柔軟かつ高度に実用展開が可能になると考えられる。たとえば、塩見らは、ボトルネックにおける速度変動を予測するモデルを構築し、そのモデルの感度分析を行うことで、ボトルネック上流地点で車線変更誘導を行うことでボトルネックにおける速度低下を抑制できる可能性を示している<sup>6)</sup>。他、鈴木らはACCの将来性能を考慮したマイクロ交通流

シミュレーションを用い、車線変更挙動モデルのパラメータを調整してキープレフトの傾向を強めることで断面交通量を増大可能であることを示している<sup>7)</sup>。しかしながら、これらの取り組みは、改善効果は発現しているものの、理論的に交通処理量を最大化している訳ではなく、必ずしも最適な状態を達成できているとは限らない。それに対して、Yao et al. はマイクロ交通流シミュレーションを用いて、個別車両の利用者線を遺伝アルゴリズムで最適化することで交通流率の改善が可能であることを示している<sup>8)</sup>。しかしながら、当該的手法では計算負荷が極めて高く、実道路における動的な制御への展開を視野に入れるためには、別のアプローチが必要となろう。

そこで本研究では、Shiomi et al.によって構築された多車線マクロ交通流モデル<sup>9)</sup>をベースに、車線別の断面交通量および平均速度の観測に基づき、各車線の利用に対して課金/割引をすることで、対象区間におけるスループットを最大化する手法を提案する。このような取り組みとして、米国で行われているHOT (High Occupancy Toll)<sup>10)</sup>やEL (Express Lane)<sup>11)</sup>の運用が挙げられる。これらの方策は車線利用料金を支払った車両に対して速達性を保証するものである。片側2車線や3車線の区間が一般的である日本の高速道路事情を考慮すると、1車線分の交通密度をコントロールして高い走行速度を維持した場合、他の車線への負の影響が大きく、全体としては遅れ時間を増大させる可能性が指摘されている<sup>12)</sup>。対して、本研究で提案するシステム

は、車線毎にFundamental Diagram (FD) が規定されているとの仮定のもと、当該区間の車線合計の交通密度に基づいて断面におけるスループットを最大化する車線利用率を算出する。その上で、算出された最適な車線利用状態に近づくよう、車線に対して課金、あるいは割引を行う点において、従来のアプローチとは一線を画するものである。

本稿の構成は以下の通りである。まず第1章では、本研究の背景と目的、および既往の研究体系における本研究の位置づけを述べた。第2章では、本研究のベースとなる多車線マクロ交通流モデルの概要を説明する。続く第3章では、車線交通量の最適化とそれを実現する課金／割引額の算出方法について詳述し、第4章にて、仮想的な円形道路に動的車線課金を適用し、その結果について考察を行う。最後に、第5章で本研究の結論と今後の課題を述べる。

## 2. 多車線マクロ交通流モデルの概要

本研究では、車線毎に FD が定義され、車線  $l$  における交通密度  $k_l$  に応じて走行速度  $v_l$  が式(1)の通りに決定されると仮定する。

$$v_l = f_l(k_l) \quad (1)$$

単路区間では、車線間での車両の増減はあるものの、交通量保存則は成立するため、その関係は式(2)として記述される。

$$\frac{\partial k_l}{\partial t} + \frac{\partial \{k_l f_l(k_l)\}}{\partial x} = \phi_l, l = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中の非斉次項  $\phi_l$  が車線間での車両の移動による収支を表現している。すなわち、微小区間において微小時間の間に車線  $l$  から車線  $l'$  へ車線変更する車両台数を  $\phi_{l \rightarrow l'}$  と表したとき、式(2)の右辺は、

$$\phi_l = \sum_{l' \neq l} \phi_{l' \rightarrow l} - \sum_{l' \neq l} \phi_{l \rightarrow l'} \quad (3)$$

と記述され、車線  $l$  に入ってくる台数 (第 1 項) と車線  $l$  から出ていく台数 (第 2 項) の差として与えられ、各車両の車線選択行動を反映して決定される。

単路区間において、車両が走行する車線を選択する際には、

- ・ 走行速度の高い車線を選択することにより所要時間を短縮させようとする項
- ・ キープレフトの原則を遵守する項

からなる効用関数に従うと仮定する。このとき、時刻  $t$  において、車両が車線  $l$  を利用することによるコスト  $c_l(k_l)$  は交通密度  $k_l(t, x)$  の関数として式(4)として表される。

$$C_l(k_l) = c_l(k_l) + \varepsilon = \alpha_l + \beta_l \{f_l(k_l)\}^{-1} + \varepsilon \quad (4)$$

ただし、 $\alpha_l$  は車線  $l$  を走行することにより交通量レベルに関わらず生じるコストを表す。キープレフト原則のため、走行車線では追越車線より小さい値として設定されるべき変数である。 $\beta_l$  は速度の逆数、すなわち単位距離あたりの所要時間に関する係数を表す。 $\varepsilon$  は認知誤差やドライバーによる希望速度の差異を表す確率項である。

確率項  $\varepsilon$  が平均 0、分散パラメータ  $\theta$  のガンベル分布に従うとすると、各車両が車線  $l$  を選択する確率は、

$$p_l(K) = \frac{\exp[-\theta c_l(k_l)]}{\sum_k \exp[-\theta c_k(k_k)]} \quad (5)$$

と記述される。ただし、 $K(t, x)$  は各車線の交通密度の合計値を表す。なお、式中、時間・空間を指定する  $(t, x)$  は簡単のため省略している。

一般に、密度と車線利用率には一定の関係性がある。本モデルでは、密度と車線利用率の関係を、車線交通量が均衡状態に達している状態であると解釈する。すなわち、各車両が走行に関わるコストを改善するように車線変更を繰り返す中で、全体としては車線交通量の均衡状態へと向かうものとして、車線変更を表現する。

車線交通量の均衡状態は式(6)で表現される。

$$p_l^* = \frac{\exp[-\theta c_l(k_l^*)]}{\sum_k \exp[-\theta c_k(k_k^*)]} = \frac{k_l^*}{K} \quad (6)$$

ただし、\*は均衡状態を表す符号である。

このとき、車線間の交通量の収支を、

$$\phi_l = \frac{1}{\tau} \left[ K \cdot \frac{\exp[-\theta c_l(k_l)]}{\sum_k \exp[-\theta c_k(k_k)]} - k_l \right] \quad (7)$$

と与えることで、車線交通量の均衡状態へと漸近させることができる。ただし、 $\tau$  は 1 以上の定数を表す。

このモデルを Godunov 法により離散化して解くことで、車線変更を考慮し、かつ密度に対する車線交通量の均衡状態の再現性を担保する多車線交通流を表現する。

## 3. 車線別課金／割引の考え方

式(6)で記述される車線利用率の均衡状態は、各ドライバーが各車線の状況を認識し、そのコストを最小化しようと車線の選択を行った結果として出現するものであり、確率的利用者均衡の状態とも言える。一方で、利用者均衡時には死加重が発生するため、社会的に最適な状況とは乖離する。このギャップを埋めるため、車線毎の利用に対して課金／割引を行うことに

より、外部効果を内部化し、社会的最適な状況を実現させることが可能となる。

ここで、単路部の交通流状態が社会的最適である状況とは、道路断面におけるスループットが最大化されている状態であると考えられる。いま、全車線合計の交通密度  $D$  が一定であるとすると、スループットを最大化する時の各車線に配分される交通密度  $d_i^*$  ( $i = 1, \dots, n$ ) は以下の最適化問題[P-1]の解として決定される。

$$\begin{aligned} \max Z(\mathbf{d}) &= \sum_i d_i \cdot f_i(d_i) \\ \text{subject to} & \\ D &= \sum_i d_i \\ d_i &\geq 0 \end{aligned} \quad \text{[P-1]}$$

この状態を出現させるため、式(8)に示す通り、車線  $i$  のコスト関数に課金/割引項  $T_i(\mathbf{k})$  を導入する。

$$\begin{aligned} C_i^{\text{toll}}(k_i) &= c_i(k_i) + T_i(\mathbf{k}) + \epsilon \\ &= \alpha_i + \beta_i \{f_i(k_i)\}^{-1} + T_i(\mathbf{k}) + \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

なお、課金額の徴収、あるいは割引額の支払いは、ETC のような路車間通信により実施されることを仮定する。すなわち、料金の受け渡しに関わる追加的なコストは発生せず、また、ドライバーは車線利用に関わる課金額・割引額を十分に認知しているものとする。

ここで、 $n$  車線中、車線  $i (\in \Psi)$  に課金/割引が適用される状況を考える。ただし、 $\Psi$  は課金/割引対象となる車線の集合を表し、その要素数は、以下を満たすものとする。

$$|\Psi| \leq n - 1$$

車線毎の交通密度が  $\mathbf{k}$  である場合に、最適な交通密度  $\mathbf{d}^*$  の状態に向かう方向に車線変更されていくよう、適切に課金/割引額  $T_i$  を設定する必要がある。そのため、任意時点の交通密度  $\mathbf{k}$ 、最適交通密度  $\mathbf{d}^*$ 、課金/割引額  $T_i$  の間には式(9)の関係が成立しなくてはならない。

$$\frac{d_i^*}{\sum_{j \neq i} d_j^*} = \frac{\exp[-\theta \{c_i(k_i) + T_i(\mathbf{k})\}]}{\sum_{j \neq i} \exp[-\theta \cdot c_j(k_j)]} \quad (9)$$

両辺に対数を取り、整理することで、求めるべき課金/割引額  $T_i(\mathbf{k})$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} T_i(\mathbf{k}) &= -c_i(k_i) \\ &\quad - \frac{1}{\theta} \cdot \ln \sum_{j \neq i} \exp[-\theta \cdot c_j(k_j)] \\ &\quad - \frac{1}{\theta} \cdot \ln \left\{ \frac{d_i^*}{\sum_{j \neq i} d_j^*} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

これより、課金額は、非課金/割引車線の効用のログサム項と、最適状況における非課金/割引車線と課金

／割引車線の最適時の交通密度の比率に関する項により構成されていることが分かる。ただし、 $|\Psi| = n - 1$  の場合、車線毎に最適な密度を達成するための課金/割引額を設定することができる一方、課金設備の設置や運用などのコストがかかることが予想される。また、 $|\Psi| < n - 1$  の場合には、非課金車線と課金車線の交通密度の比率を最適化に向かわせることができるものの、非課金車線内での車線利用率は必ずしもそうなるとは限らない。すなわち、次善の課金/割引手法に相当することが考えられる。

#### 4. 仮想単路区間における数値計算例

本章では、動的車線課金/割引の基本性能、および交通状態の改善効果を検証するため、仮想的な無限延長の単路区間を想定した数値計算を行う。

##### (1) 仮想単路区間の設定

無限延長の単路区間を疑似した片側 3 車線の仮想円形道路を想定する。計算負荷の軽減のため、進行方向には 3 つのセルで構成されるものとし、最下流のセルから流出した交通流は、最上流のセルへ流入するものとする。各セルには車線毎に FD を設定し、同一車線であれば、進行方向上のどのセルも同一の FD 形状を持つものとする。なお、本研究では、FD は式(11)に示す Drake 式に従うものとする。

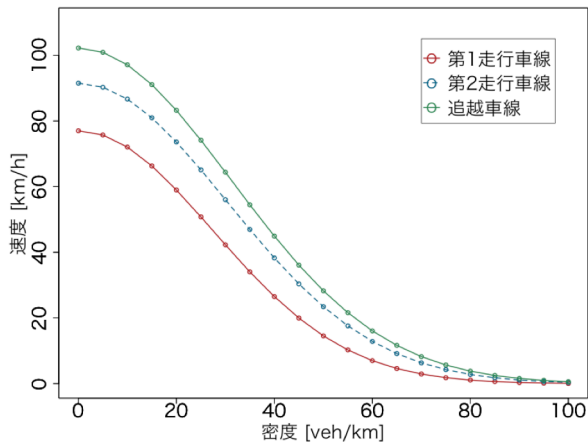
$$v = v_f \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{k}{k_c} \right)^2 \right] \quad (11)$$

ただし、 $v, k$  はそれぞれ速度と密度、 $v_f$  と  $k_c$  はそれぞれ自由流速度と臨界密度を表す。

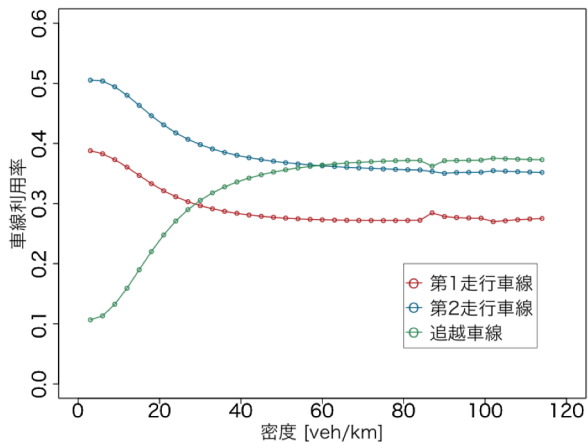
FD パラメータ、および式(4)の車線利用効用に関する各パラメータは、Shiomi et al.<sup>9)</sup> で用いられた中国自動車道上り線宝塚西トンネル付近、20.32kp 地点でループ式車両感知器による車線別の 5 分間平均速度、交通量の観測データ（観測期間：2010 年 3 月 16 日～23 日、4 月 20 日～30 日、5 月 1 日～18 日、7 月 15 日～31 日、9 月 1 日～14 日のうち、事故・規制のない平日 30 日間）を用いて車線毎にキャリブレーションを行った。各パラメータの設定値を表-1 に示す。このときの車線毎の

表-1 パラメータの設定

	$v_f$ [km/h]	$k_c$ [veh/km]	$\alpha$ [ $\times 10^{-2}$ ]	$\beta$ [ $\times 10^4$ ]	$\theta$ [ $\times 10^3$ ]
第1 走行	77.0	27.4	0	10.0	
第2 走行	91.5	30.3	1.509	7.946	1.086
追越 車線	102.2	31.2	2.014	7.844	

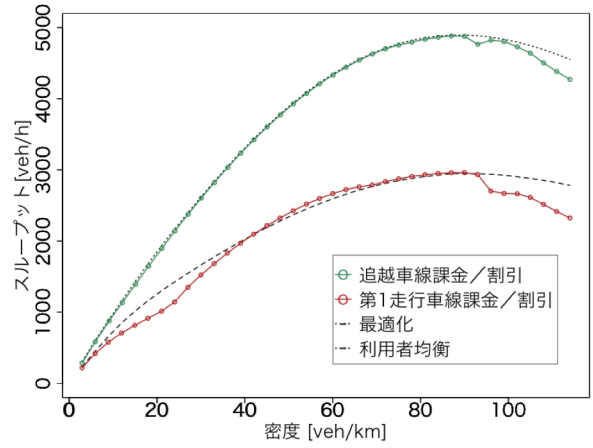


(a) 車線別 FD

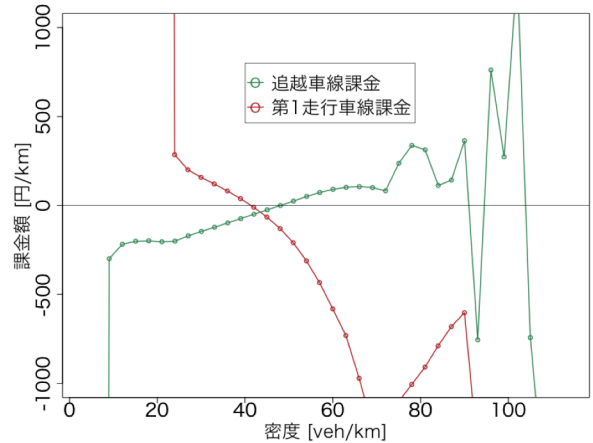


(b) 交通密度と車線利用率の関係

図-1 基本設定時における FD と車線利用率曲線



(a) スループットの比較



(b) 課金/割引額

図-2 1車線のみへの課金/割引実施時

FD, および密度に対する車線利用率の算出結果を図-1に示す。

### (2) シミュレーションの設定

数値計算を実行するにあたり、タイムステップ間隔  $dt$  を 10 秒とし、それに従って各セルの区間長を 283.9m に設定した。その上で、交通密度レベル毎に車線利用率や課金/割引額、およびスループット値を比較するため、各車線のセルの密度を 1 [veh/km] から 120 [veh/km] まで 3 [veh/km] ずつ増加させていながら、各密度において車線交通量均衡状態を算出した。

均衡状態の算出に当たっては、Shiomi et al.<sup>9)</sup>の方法を用いた。すなわち、与えられた車線合計密度に対して、各セルに均等に車両を配置した状態を初期状態 (タイムステップ数 = 0) とし、式(7)中の  $\tau$  をタイムステップ数と同値になるように設定した。なお、 $\tau$  は車線やセルによらず同値とする。

### (3) 数値計算結果

第 1 走行車線のみ、あるいは追越車線のみを課金/割引対象車線にした状況を想定し、交通密度とスループットの関係、および交通密度と課金/割引額の関係

を算出する。ただし、課金/割引額は、式(8)より「単位距離あたりの時間」の単位で表現される。そこで、算出された値に時間価値 56.78 円/分<sup>13)</sup>をかけ、1km あたりの金額として求めた。その結果を図-2に示す。

図-2(a)は、追越車線、あるいは第 1 走行車線に課金を実施した場合の密度-スループットの関係に加え、一切の課金を実施しない、すなわち確率的利用者均衡状態におけるスループット、および最適化問題[P-1]の解として得られる最適な車線利用が達成できている状況におけるスループットも併せて示す。これより、追越車線に課金をする場合、ほぼ最適車線分担時のスループットに近い値となっている一方、第 1 走行車線に課金した場合には、密度が 50~70 veh/km の時にわずかに利用者均衡状態より上回っているものの、概ね同値か低い値になっていることが分かる。この要因について、課金額の変動と併せて考察を行う。

まず、追越車線に課金する場合、密度が低い状況では、追越車線に $-\infty$ の課金 (=  $\infty$ の割引) が適用され、全ての車両が追越車線を利用する状況となっている。その後、交通需要が増加するにつれ、割引額が減少していき、密度が 50 veh/km を超えたあたりから、課金額が正に転じ、追越車線の利用の偏りを抑制する方向



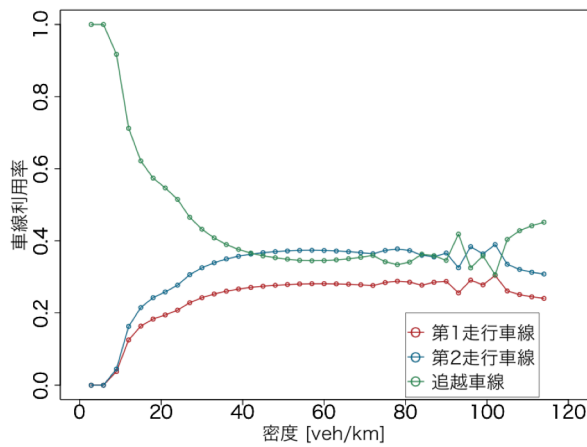


図-3 追越車線課金時の交通密度と車線利用率の関係

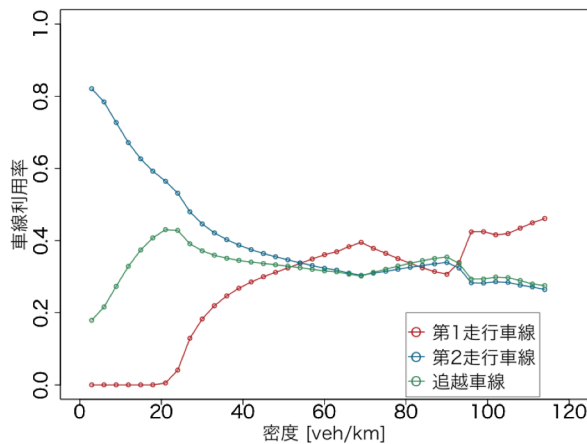


図-4 第1走行車線課金時の交通密度と車線利用率の関係

へ作用していることが考えられる。また、密度が 70 veh/km 以上になると課金額が振動している様子が読み取れる。これは、車線によって渋滞／非渋滞が混在する状況にあり、それによって課金額が大きく変動するためであると考えられる。これらの傾向は図-3 に示す密度に対する車線利用率の変動傾向からも確認することができる。

一方、第1走行車線のみ課金する場合、密度が低い状況では、交通容量の低い第1走行車線には一切、車両が存在しないように $\infty$ の課金額が課されている。しかしながら、スループットは利用者均衡状態より低くなっている。これは、第2走行車線と追越車線のみ交通需要が負荷されるものの、全体的に交通密度が低いいため、式(4)中のコスト関数の定数項の値が相対的に大きく、第2走行車線に利用が集中し、結果として利用者均衡時よりもスループットが低くなったものと考えられる。交通密度が 50~70 veh/km の時には、第1走行車線に割引きをすることにより、追越車線側に偏りがちな交通需要を第1走行車線にシフトさせることで、利用者均衡状態よりスループットの高い状況が出現したものと考えられる。これらの傾向は、図-4に示す車線利用率の変動からも合理的に説明される。

以上の結果より、追越車線に課金する場合には、利用者均衡状態より高いスループットを実現可能であることが示された。ただし、交通密度が少ない状況で車線利用コストを割引くことで追越車線の利用を促進する、というのは実際の交通運用を考慮すると非現実的である。また、高い交通密度で課金額が大きく変動する、というのも受け入れられ難いであろう。一方、臨界に近い交通需要時に追越車線への利用の偏りを抑制し、スループットを改善するような場合には、利用者の受容性も高いものと考えられる。今後は、より現実的な適用場面を想定し、利用者の受容性が高く、かつ高い効果を発揮するような運用方法について検討を行う必要がある。

## 5. おわりに

本稿では、高速道路単路区間における交通密度に対する車線利用率の関係を、利用者均衡状態として表現する多車線マクロ交通流モデルを発展させ、車線別課金によりスループットを最大化するための理論的な枠組みを提示した。また、仮想的な円周道路を対象とした数値計算により、提案する車線別課金システムの挙動を分析した。

今後は、具体のボトルネック箇所を対象に、現実の制約条件を考慮し、社会的受容性が高く、かつ交通流動の改善効果の得られる車線別課金制度の体系の構築に取り組みたい。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費 JP16H04433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) E-NEXCO Report2016, 東日本高速道路株式会社, 2016.
- 2) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡辺亨: ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態, 交通工学, Vol. 36, No. 36, pp. 59-69, 2001.
- 3) Wu, N.: Equilibrium of Lane Flow-Distribution on Motorways, Journal of Transportation Research Board 1965, pp.48-59, 2006.
- 4) Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C. and van Arem, B.: Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits, Proceedings of the IEEE conference on Intelligent Transport Solutions, 2010.

- 5) 原田秀一, 深瀬正之, 前島一幸, 佐藤久長, 瀬古賢司: 車線利用率平準化による高速道路の渋滞対策効果検証, 交通工学 Vol.42, No.5, pp.74-79, 2007.
- 6) 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏, 嶋本寛: 個別車両データを用いた単路部ボトルネックにおける速度変動予測と車線変更誘導による渋滞抑止効果の検証. 高速道路と自動車, Vol. 56, No.3, pp. 30 – 40, 2013.
- 7) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集 Vol.1, No.2 特集号, p. B\_60-B\_67, 2015.
- 8) Yao, S., Knoop, V.L., Van Arem, B: Optimizing traffic flow efficiency by controlling lane changes: collective, group and user optima. Accepted for transportation research records, No. 2622, 2017 (in press).
- 9) Shiomi, Y., Taniguchi, T., Uno, N., Shimamoto, H., and Nakamura, T.: Multilane first-order traffic flow model with endogenous representation of lane-flow equilibrium, Transportation Research Part C Vol.59, pp. 198-215, 2015.
- 10) Jang, K., Chung, K., and Yeo, H.: A dynamic pricing strategy for high occupancy toll lanes. Transportation Research Part A, Vol. 67, pp. 69-80, 2014.
- 11) Schult, G., Mineer, S., and Hamblin, C.: An Analysis of Express Lanes in Utah, Transportation Research Procedia, Vol. 15, pp. 561-572, 2016.
- 12) 西内裕晶, 塩見康博, 割田博: 通過人員ベースの道路輸送能力評価手法の提案 - 首都高速道路を対象に, 第 49 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-R, 2014.
- 13) 時間価値原単位および走行経費原単位 (平成 20 年価格) の算出方法, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/hyouka-syuhou/4pdf/s1.pdf>, 2017 年 4 月 28 日アクセス.

(2017. \*\*. \*\* 受付)

## OPTIMIZING TRAFFIC FLOW BY LANE-BASED TOLL

Yasuhiro SHIOMI