

ダイナミックロードプライシングにおける 突発渋滞を考慮した料金調整手法の提案

吉田 茉菜^{1,a)} 川上 朋也¹ 柴田 直樹¹ 伊藤 実¹

概要: 交通渋滞を減らすための取り組みの一つに、リアルタイムな道路状況に応じて利用料金を変動させるダイナミックロードプライシングがある。我々の研究グループでは需要分布に基づく料金決定手法を提案しており、本研究では、事故などの突発的事象発生時に変化した道路状況を反映したインセンティブの金額を計算し、利用者へ通知することでいかなる状況においても交通量を制御可能な料金手法を検討する。このインセンティブの額を適切に決定することで、利用者の一部に別の経路や一般道路へ変更してもらい、道路利用者数をコントロールする。検討方法を計算機上でシミュレーションを行い、突発的事象発生時にも交通量をコントロールできていることを確認した。

1. はじめに

世界では13億台もの車が保有され、日本国内でも7800万台の車が保有されている [1]。その一方多様な交通手段が出現したことにより、利用できる移動手段の選択肢は自家用車に限らず様々な手段が選べるようになってきた。しかし、依然として自家用車を利用して移動する人々は多く、交通渋滞が多く発生しているのが現状である。日本においては、渋滞による年間経済的損失は年間38.1億人時間であり紙幣換算すると約1.2兆円となる [2]。これは日本のGDPの約2パーセントに相当する。渋滞を削減するためには、道路の利用者数（交通量）を走行可能な量（交通容量）以下に制御する必要がある。交通量を制御する取り組みは交通需要マネジメント（Transportation Demand Management, TDM）と呼ばれる [3]。本研究では、TDMのひとつであるロードプライシングを扱う。

ロードプライシングとは、特定の道路や区間を利用する利用者に対して、料金を徴収することで交通量をコントロールし、渋滞の解消や渋滞の抑制を行うことである [4,5]。諸外国におけるロードプライシング導入事例にはシンガポールの道路料金自動徴収制度（Electronic Road Pricing, ERP）やスウェーデンの混雑税、アメリカのHOTレーン（High Occupancy Toll Lane）、HOVレーン（High Occupancy Vehicle Lane）が挙げられる [6]。シンガポールのERPでは料金の徴収にICカードを用い、日本の電子料金

収受システム（Electronic Toll Collection System, ETC）とは異なり、前払い制であらかじめチャージしておく必要がある。シンガポールでのロードプライシングの場合、ガントリーというゲートが都市部に入る道路に設置してあり、ガントリーの下を車が通ると、車載機に差し込まれたICカードから料金が自動的に引かれる。料金に関しては、車種、時間帯ごとに決められており、料金の設定は3か月ごとに改定され、メディアを通して国民に伝えられる。このようなシンガポールの事例をはじめ、実用化されたロードプライシングは料金がある時間、ある区間固定である場合が多い。

ロードプライシングの中でも、道路状況に応じて料金を変動させる方法をダイナミックロードプライシング（Dynamic Road Pricing, DRP）という。ダイナミックロードプライシングは従来のロードプライシングよりも効率的に道路交通量をコントロールできる。ダイナミックロードプライシングの実用化は情報通信技術を用いることにより可能であると考えられる。特に日本の高速道路のETC利用率は、89.7% [7]と高いことから、実現可能であるといわれている。

我々の研究グループでは、道路の料金による利用者数を大まかに把握できる環境において、需要分布に基づく料金決定手法を提案している [8] [9] [10]。我々の先行研究では経路、時間帯ごとの料金による利用需要の分布を用い、各道路区間で交通容量を超えないという制約の下、道路事業者の総収入を最大化する料金の組合せ最適化を行う。しかし、実際の道路では突発的な事故などによって混雑が起きるため、それらの状況変化を利用料金に反映し、動的に更

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
^{a)} yoshida.mana.yg1@is.naist.jp

新する必要がある。また、状況が変化した道路区間より前を走行中の利用者においては、道路や交通、利用料金の変化によっては、別の経路や一般道路への切り替えることが予想される。

そこで本研究では、事故などの突発的な事象によって道路状況が変化した場合に一部の利用者に対してインセンティブを与えることを検討する。突発的な事象が生じている区間に流入する利用者に対してインセンティブを提示することで、利用者はその金額によって有料道路を使用するか、迂回して一般道への切り替えを行うかを判断する。よって、インセンティブの大きさを適切に設定することで、突発的な事象発生時にも迅速に交通量のコントロールを行うことができ、渋滞発生を防ぐことができる。本研究では交通渋滞を以下の二種類に分類する。

- 予測可能な渋滞：需要分布をもとに、各時間、各経路の需要と料金の関係が分かっているという想定のもとでは、交通量を交通容量以下にすることで発生を抑制できる渋滞のことを表す。
- 予想不可能な突発的な事象による渋滞：突発的な事象というのは、事故や急な天候不良による事象をさす。これらにより、一時的に交通容量が変化することで事前に予測不可能な渋滞が生じる。それらを予測不可能な突発的な事象による渋滞として定義する。

これらの二種類の渋滞に有効な料金決定方法を提案することで様々な状況にも対応可能な料金決定手法を目指す。

2. 先行研究における料金決定

2.1 概要

我々の研究グループでは、道路事業者が事前に出発地、目的地、時間帯ごとの利用者の需要分布に関する情報を得ている環境を想定し [11]、需要分布に基づく利用料金決定手法を提案している [8–10]。ここでの需要分布とは、道路の利用料金に対する利用者数の分布を指す。また、各道路区間には、単位時間あたりに走行可能な車両台数（可能交通容量）があらかじめ定められているものとしている。利用料金を決定する道路とは別に、利用料金が不要な一般道路も並走されているものとし、事前に提示された利用料金が最も低い経路でも高いと判断した車両は一般道路を利用する。さらに、各車両は流体モデルに従って等速で移動するものとしている [12, 13]。

先行研究では上記の環境において、出発地、目的地、時間帯ごとの利用料金を決定し、利用者へ事前に提示するシステムを想定している。各利用料金を求める問題は最適化問題として表現するため、2.2 節で述べる定式化を行っている。

2.2 定式化

先行研究では、入力、出力、制約条件、目的関数に分け

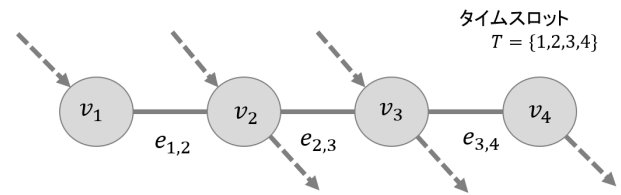


図 1 有料道路の例

て問題を定式化している。

2.2.1 入力

入力は道路、利用者（車両）、需要分布の 3 つである。それぞれ以下に述べる。

● 道路

道路網を有向グラフ $G = (V, E)$ で表し、道路網に存在する出入口（ノード）を $v_i \in V$ 、ノード v_i, v_j 間の道路区間（リンク）を $e_{i,j} \in E$ とする。また、区間 $e_{i,j}$ を利用可能な車両の最大数（交通容量）を $c_{i,j}$ 、時刻 $t \in T$ における $e_{i,j}$ の利用者数（交通量）を $n_{i,j,t}$ とする。ここで、 T は利用可能なすべての時間（タイムスロット）を表す。ノード $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 、タイムスロット $T = \{1, 2, 3, 4\}$ の有料道路の例を図 1 に示す。図 1 は片方向の道路で、破線は各ノードでの一般道路との出入りを表す。

● 利用者

各利用者は希望の出発ノード $v_s \in V$ 、到着ノード $v_g \in V$ 、出発時刻 $t_s \in T$ を持つ。

● 需要分布

出発ノード v_i 、到着ノード v_j によって一意に決める最短経路を $R(i, j)$ とする。また、出発時刻 t で経路 $R(i, j)$ を利用したい利用者数（需要）を $N_{i,j,t}$ 、料金 x での需要の割合を表す需要分布を確率密度関数 $f_{i,j,t}(x)$ とする。 $f_{i,j,t}(x)$ の累積分布関数を $F_{i,j,t}(x)$ とすると、出発時刻 t で経路 $R(i, j)$ の料金が $p_{i,j,t}$ の場合に予測される利用者数は $(1 - F_{i,j,t}(p_{i,j,t}))N_{i,j,t}$ となる。需要分布は経路 $R(i, j)$ と出発時刻 t ごとを想定するため、分布の数は最大で各道路が片方向の場合に $|V|C_2|T|$ 、双方向の場合に $2|V|C_2|T|$ となる。ここで、 $|V|$ はノード数を、 $|T|$ はタイムスロット数を表す。

2.2.2 出力

出力として、利用可能なすべての経路 $R(i, j)$ 、出発時刻 t に対して料金 $p_{i,j,t}$ を決定する。利用者は入力として前述の出発ノードと到着ゲート、出発時刻を事前に指定し、出力として得られた最も低い料金に基づいて、有料道路を利用するかどうかを判断する。有料道路を利用しないと判断した場合、並走されている一般道路を利用する。

2.2.3 制約条件

先行研究では、道路のすべての区間で常に交通容量を越

えないことを想定する。そのため、制約条件として、以下をすべての時刻 t と区間 $e_{i,j}$ で満たす必要がある。

$$n_{i,j,t} \leq c_{i,j} \quad \forall e_{i,j} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

2.2.4 目的関数

出発時刻 t で経路 $R(i,j)$ を利用するすべての利用者から得られる収入は、 $(1 - F_{i,j,t}(p_{i,j,t}))N_{i,j,t}p_{i,j,t}$ となる。先行研究では道路事業者の利益を最大化するため、すべての経路と出発時刻での利用者からの収入を最大化する以下の式 2 を目的関数とする。目的関数は事故などによって利用料金を更新する場合も変わらない。

$$\max \sum_i \sum_j \sum_{t \in T} (1 - F_{i,j,t}(p_{i,j,t}))N_{i,j,t}p_{i,j,t} \quad (2)$$

2.3 料金決定の流れ

先行研究では、2.2 節の問題設定における組合せ最適化を行っている。最適化の流れを以下に示す。

- (1) 経路と出発時刻ごとの需要分布に対して、料金をそれぞれ仮に設定
- (2) 関係する利用需要の累積分布から、各時刻の利用者数を区間ごとに予測し、すべて交通容量を満たすかどうかを判別
- (3) 仮に設定した料金で、利用者からの総収入を計算
- (4) 各料金を変更して繰り返し、総収入が最大となる料金を求める

2.4 問題点と本研究の位置付け

以上の我々の先行研究では、あらかじめ得られている需要分布の精度が高ければ、高い確率で渋滞発生を抑制しつつ、道路事業者の収益も高められる。しかし、現実には需要分布の推定に誤差が生じるほか、事故などによる突発的な渋滞（突発渋滞）も発生する。これら微小な渋滞や突発的な渋滞は範囲の拡大や重篤化、追突事故などの二次被害を引き起こす一方、先行研究では一度決定した利用料金の調整や更新を考えていないため、渋滞の速やかな解消や軽減を行えない。

本研究では上記の問題を解決するため、突発的事象により交通容量が変化した区間を利用する予定であった利用者に対して、利用を取りやめる場合に利用料金の減額（インセンティブの提供）を行う調整手法を提案する。有料道路を走行し続ける利用者には、先に示した料金決定方法で決まった料金を徴収し、利用をとりやめる利用者にはインセンティブを与える。そうすることで、突発的な事象発生時にも渋滞の発生をコントロールすることができる。次の章にてインセンティブの金額を決定する方法を説明する。

表 1 各時刻・各経路の利用料金

t	$R(1,2)$	$R(1,3)$	$R(1,4)$	$R(2,3)$	$R(2,4)$	$R(3,4)$
1	$p_{1,2,1}$	$p_{1,3,1}$	$p_{1,4,1}$	$p_{2,3,1}$	$p_{2,4,1}$	$p_{3,4,1}$
2	$p_{1,2,2}$	$p_{1,3,2}$	$p_{1,4,2}$	$p_{2,3,2}$	$p_{2,4,2}$	$p_{3,4,2}$
3	$p_{1,2,3}$	$p_{1,3,3}$	-	$p_{2,3,3}$	$p_{2,4,3}$	$p_{3,4,3}$
4	$p_{1,2,4}$	-	-	$p_{2,3,4}$	-	$p_{3,4,4}$

表 2 各時刻・各経路の利用者数

t	$R(1,2)$	$R(1,3)$	$R(1,4)$	$R(2,3)$	$R(2,4)$	$R(3,4)$
1	$n_{1,2,1}$	$n_{1,3,1}$	$n_{1,4,1}$	$n_{2,3,1}$	$n_{2,4,1}$	$n_{3,4,1}$
2	$n_{1,2,2}$	$n_{1,3,2}$	$n_{1,4,2}$	$n_{2,3,2}$	$n_{2,4,2}$	$n_{3,4,2}$
3	$n_{1,2,3}$	$n_{1,3,3}$	-	$n_{2,3,3}$	$n_{2,4,3}$	$n_{3,4,3}$
4	$n_{1,2,4}$	-	-	$n_{2,3,4}$	-	$n_{3,4,4}$

3. 問題設定

3.1 想定環境

突発的な渋滞発生時に道路事業者は通常の予測可能な渋滞発生を考慮した料金決定に使用した情報（4章参照）に加えてどこの地点で突発的な事象がおきているのかと、それに伴う交通容量の変化量を観測可能であるとする。それらの情報をもとに、該当区間への流入する予定であった利用者を一般道路へ再分配するためにインセンティブの金額を決定する。利用者へ突発的事象発生に関する通知は道路情報板や道路交通情報通信システム（Vehicle Information and Communication System, VICS）、路側放送（ハイウェイラジオ）[14]などで行う。当該区間より前を走行中の利用者は配信された情報の中のインセンティブの金額に基づいて、その後に別の経路や一般道路へ切り替えるかどうかを判断する。

3.2 定式化

本研究の想定環境において、適切なインセンティブの金額を求める問題を最適化問題として表現するために、入力、出力、制約条件、目的関数に分けて定式化する。

3.2.1 入力

事前に予測可能な渋滞発生を考慮した料金決定（2章参照）で決定した料金と有料道路利用者数に加えてどこの地点で突発的な事象がおきているのかと、それに伴う変化後の交通容量を入力する。

- 事前に決定した情報

事前に予測可能な渋滞発生を考慮した料金決定方法で決定した各経路、各時刻ごとの料金を $p_{i,j,t}$ （表 1）と利用者数を $n_{i,j,t}$ （表 2）とする。

- 突発的事象に関する情報

突発的事象が発生した場合に、どの区間のどの時間帯で利用者を再分配しなければならないか把握する必要がある。そのため、どの区間でどの時間突発的事象がおきているか事故インデックス $k = \{k_1, k_2, \dots\}$ で表す。さらに、突発的な事象によって交通容量が

変化する割合を $Q = \{q_{1,2,t}, q_{2,3,t}, q_{3,4,t}\}$ とする。修正後の交通容量 $C_{i,j,t} = q_{i,j,t}c_{i,j}$ となる。例えば、リンク $e_{1,2}$ と $e_{2,3}$ が $T = [1, 2]$ の間事故によって利用可能な車線が半数に減少した場合、 $k = 1, 2, 4, 5$, $Q = \{0.5, 0.5, 1\}, C_{t=1,2} = \{0.5c_{1,2}, 0.5c_{2,3}, c_{3,4}\}$ となる。その区間の修正後の交通容量を

- インセンティブの大きさと利用を中断する利用者数の分布

出発ノード v_i , 到着ノード v_j によって一位に決められた最短経路 $R(i, j)$ とする。その $R_{i,j}$ を利用する際の金額をもとにしたインセンティブの金額の割合 $x_{i,j,t,k}$ とする。その場合の、有料道路利用を中断する利用者数の割合を表す関数を $g_{i,j,t,k}(x)$ とする。利用区間と突発的事象発生区間の関係から重みづけを行い、その重みを $h_{i,j,k}$ とする。関数 $g_{i,j,t,k}(x_{i,j,t,k})$ は以下に示す。

$$g_{i,j,t,k}(x_{i,j,t,k}) = h_{i,j,k} x_{i,j,t,k}^2 \quad (3)$$

3.2.2 出力

本研究では出力として、突発的事象により再計算の対象となる経路 $R(i, j)$ の利用を中断する利用者には支払うインセンティブの金額 $P_{i,j,t}$ を決定する。出力として得られたインセンティブの金額 $P_{i,j,t}$ に基づいて、有料道路を利用するかどうかを判断する。有料道路を利用しないと判断した場合、有料道路の利用をやめ一般道路を利用する。有料道路を利用し続ける場合には元の利用料金 $p_{i,j,t}$ を支払い、利用をせずに一般道路を利用する場合は $P_{i,j,t,k}$ のインセンティブをうけとる。

$$P_{i,j,t,k} = p_{i,j,t} x_{i,j,t,k} \quad (4)$$

3.2.3 制約条件

本研究では、すべての区間で常に交通容量を越えないことを想定する。そのため、突発的事象により交通容量が変化した後にも制約条件として、以下をすべての時刻 t と区間 $e_{i,j}$ で満たす必要がある。

$$n_{i,j,t} \leq C_{i,j,t} \quad \forall e_{i,j} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

3.2.4 目的関数

突発的事象発生時に出発時刻 t で経路 $R(i, j)$ の利用を中断して払い戻しをうける利用者数は、 $g_{i,j,t,k}(x_{i,j,t,k})$ となる。さらに各経路のインセンティブの大きさは $x_{i,j,t,k} p_{i,j,t}$ となる。よって、各経路の利用をやめた利用者には支払うインセンティブ額は $g_{i,j,t,k}(x_{i,j,t,k}) n_{i,j,t} x_{i,j,t,k} p_{i,j,t}$ となる本研究では道路事業者の利益を最大化するため、すべての経路と出発時刻でのインセンティブの合計を最小化する以下の式 6 を目的関数とする。

$$\min \sum_i \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k g_{i,j,t,k}(x_{i,j,t,k}) n_{i,j,t} x_{i,j,t,k} p_{i,j,t} \quad (6)$$

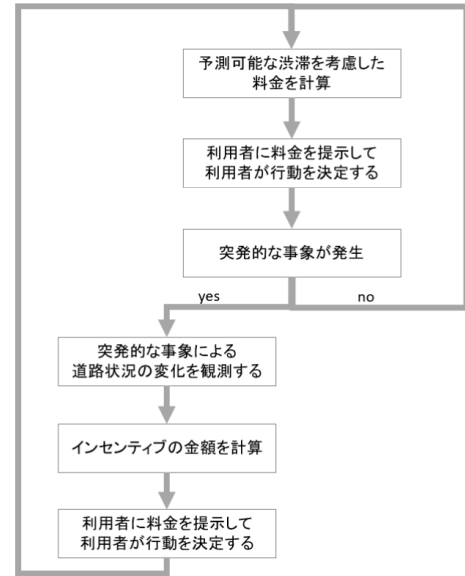


図 2 提案手法の流れ

3.3 料金決定の流れ

本研究では、先ほど示した問題設定における組合せ最適化を行う。最適化の流れを以下に示す。

- 突発的事象の発生により変化した交通容量とその区間を観測する
- それに伴う交通容量の変化量と区間の入力を準備する
- 突発的事象発生区間の利用をとりやめた利用者に対して支払うインセンティブの金額を仮に設定する
- インセンティブ額と利用者の行動を表した関係式から交通量を再計算してそれらが変化後の交通容量を以下であるか判別する
- 各経路のインセンティブ額を変更して繰り返し、インセンティブ額の総計が最小となる料金を求める

4. 突発渋滞を考慮した料金調整手法

本研究のモデルは、図 2 に示すような流れとなっている。本研究ではまず、章にて説明した問題設定を用いて、有料道路の各区間、各時刻ごとの利用料金を決定する。その後、突発的事象が発生し交通容量が変化した場合にのみ 3 章で説明したインセンティブ額決定のフェーズに入る。それらをタイムスロットごとに行い、交通量をコントロールする。

5. 評価

5.1 シミュレーション環境

図 3 に示すようなノード数 4、区間数 3 からなる道路網を用いた。各区間の交通容量はすべて 100 で、タイムスロット $T = \{1, 2, 3, 4\}$ である。また、本シミュレーションでは単純化のため、各車両は単位時間あたりに 1 区間を走行するものとした。シミュレーションの継続中のすべての

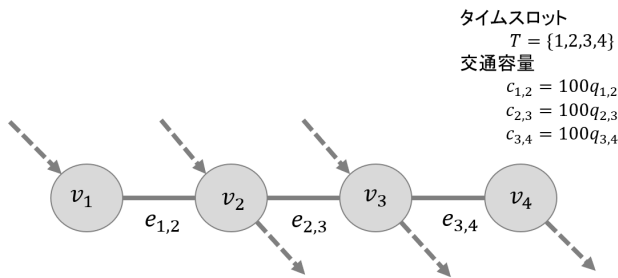


図 3 シミュレーションに使用した道路網

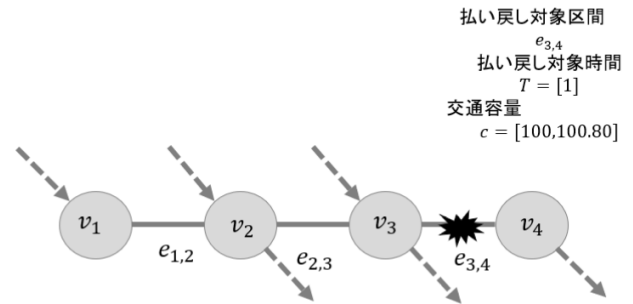


図 4 事故発生時の道路網

表 3 各時刻・各経路の利用料金

t	R(1, 2)	R(1, 3)	R(1, 4)	R(2, 3)	R(2, 4)	R(3, 4)
1	523.78	1113.92	1650.92	514.45	973.43	383.53
2	517.48	1140.03	1635.25	613.22	1119.23	514.35
3	503.56	999.74	-	607.65	1110.12	521.25
4	391.84	-	-	500.43	-	530.31

表 4 各時刻・各区間を走行する車両数

t	e _{1,2}	e _{2,3}	e _{3,4}
1	99.82	99.9	87.79
2	99.86	99.62	99.58
3	99.63	99.98	99.88
4	86.03	99.88	99.79

時間帯において、任意のノードから残りの時間内に到達可能なノードに向かって道路の利用が発生する。

5.2 需要分布を用いた料金決定の結果

まず、2章にて説明した需要分布に基づく料金決定方法のシミュレーションとして差分進化法を用いた結果を表3に示す。表3は組合せ最適化によって求められた、各時刻、各経路の利用料金を表している。また、表3の料金によって、各時刻、各区間を走行する車両数を表4に示す。需要分布として、平均値 $\mu = 500 * dist$, 分散 $\sigma^2 = \mu/5$ に従う正規分布の生存関数を用いた。ここで、 $dist$ はその需要分布を構成する利用者が走行する区間の数である。また、正規分布の確率密度関数を以下に示す。

$$f_{i,j,t}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{i,j,t}^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{i,j,t})^2}{2\sigma_{i,j,t}^2}\right) \quad (7)$$

需要の累積分布関数と差分進化アルゴリズムには、オープンソースソフトウェアの SciPy 0.13.0b1*¹を用いた。なお、差分進化法のパラメータは個体数（集団サイズ） N_{pop} を 15、個体の変数の下限と上限をそれぞれ $x_{lb} = \mu - 3\sigma$, $x_{ub} = \mu + 3\sigma$ とし、突然変異率 F , F' と交叉率 CR をともに 0.7 とした。また、世代数の最大は 10,000 とした。

5.3 単一区間での事故の場合

5.3.1 シミュレーション環境

図4に示すような $e_{3,4}$ のリンクが $t = 1$ の時突発的現象

*¹ SciPy: <https://www.scipy.org/> (accessed Aug. 1, 2019)

表 5 各時刻・各経路の利用料金

t	R(1, 2)	R(1, 3)	R(1, 4)	R(2, 3)	R(2, 4)	R(3, 4)
1	523.78	1113.92	1650.92	514.45	973.43	388.53
2	517.48	1140.03	1635.25	613.22	1119.23	514.35
3	503.56	999.74	-	607.65	1110.12	521.25
4	391.84	-	-	500.43	-	530.31

表 6 各時刻・各経路のインセンティブの金額

t	R(1, 2)	R(1, 3)	R(1, 4)	R(2, 3)	R(2, 4)	R(3, 4)
1	-	-	-	-	-	114(119)
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-

表 7 各時刻・各経路の利用をやめた利用者数

t	R(1, 2)	R(1, 3)	R(1, 4)	R(2, 3)	R(2, 4)	R(3, 4)
1	-	-	-	-	-	7.8(21.9)
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-

により交通容量の割合が $Q = \{1, 1, 0.8\}$ となった場合のインセンティブの金額を求める。インセンティブ受け取りの対象となる区間の利用料金は表5の下線の部分である。提案方式の比較対象としては、もともとの各経路の利用料金の半額をインセンティブとする場合のインセンティブの価格と利用を取りやめる利用者数、インセンティブの合計を求めた。

5.4 シミュレーション結果

提案方式で差分進化法を用いて最適化を行った結果、 $t = \{1\}$ の時に $e_{3,4}$ の利用をやめた利用者に支払うインセンティブの金額は表6に、利用を中断した車両数は表7に示すようになった。さらに、各区間ごとの車両数を表8に示す。それぞれの表の括弧内の値は利用料金の半額をインセンティブとした場合の結果である。

最後に料金徴収によって得られる総収入の値とインセンティブにかかる費用の合計額を比較した値を表9に示す。

表 8 再計算後の各時刻・各区間を走行する車両数

t	$e_{1,2}$	$e_{2,3}$	$e_{3,4}$
1	99.82	99.9	80.00(65.84)
2	99.86	99.62	99.58
3	99.63	99.98	99.88
4	86.03	99.88	99.79

表 9 総収入の変化量

料金収入	インセンティブの合計	インセンティブの合計 (固定割合の場合)
594551.8	890.5(0.1%)	4208.90(0.7%)

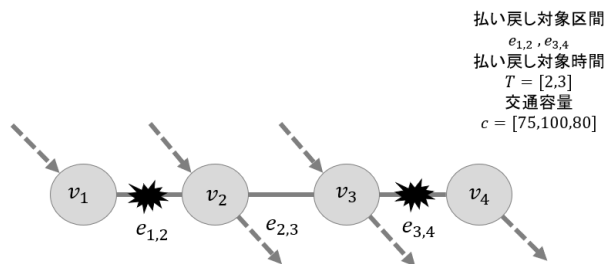


図 5 事故発生時の道路網

表 10 各時刻・各経路の利用料金

t	$R(1, 2)$	$R(1, 3)$	$R(1, 4)$	$R(2, 3)$	$R(2, 4)$	$R(3, 4)$
1	523.78	1113.92	1650.92	514.45	973.43	388.0
2	517.48	1140.03	1635.25	613.22	1119.23	514.355
3	503.56	999.74	-	607.65	1110.12	521.25
4	391.84	-	-	500.43	-	530.31

5.5 複数区間での事故の場合

5.5.1 シミュレーション環境

図 5 に示すような $e_{1,2}, e_{3,4}$ のリンクが $t = \{2, 3\}$ の時突発的事象により交通容量の割合が $Q = \{0.75, 1, 0.8\}$ となった場合のインセンティブの金額を求める。これは複数地点で同時に突発的事象が起きた場合を表している。インセンティブの対象となる区間の利用料金は表 10 の下線の部分である。

5.6 シミュレーション結果

提案方式で差分進化法を用いて最適化を行った結果、 $t = \{1\}$ の時に $e_{3,4}$ の利用をやめた利用者に支払うインセンティブの金額は表 11 に、利用を中断した車両数は表 12 に示すようになった。さらに、各区間ごとの車両数を表 13 に示す。それぞれの表の括弧内の値は利用料金の半額をインセンティブとした場合の結果である。

最後に料金徴収によって得られる総収入の値とインセンティブにかかる費用の合計額を比較した値を表 14 に示す。

表 11 各時刻・各経路のインセンティブの金額

t	$R(1, 2)$	$R(1, 3)$	$R(1, 4)$	$R(2, 3)$	$R(2, 4)$	$R(3, 4)$
1	-	-	157.66 (825.46)	-	277.12 (486.72)	-
2	375.68 (258.74)	324.05 (570.02)	277.66 (817.63)	-	242.30 (559.62)	323.09 (257.18)
3	334.64 (251.78)	234.87 (499.87)	-	-	-	350.91 (260.62)
4	-	-	-	-	-	-

表 12 各時刻・各経路の利用をやめた利用者数

t	$R(1, 2)$	$R(1, 3)$	$R(1, 4)$	$R(2, 3)$	$R(2, 4)$	$R(3, 4)$
1	-	-	0.14 (3.77)	-	2.10 (9.67)	-
2	22.69 (10.77)	1.56 (4.84)	0.60 (5.22)	-	0.90 (4.82)	17.48 (11.07)
3	21.45 (12.15)	2.21 (10.01)	-	-	-	18.85 (10.40)
4	-	-	-	-	-	-

表 13 再計算後の各時刻・各区間を走行する車両数

t	$e_{1,2}$	$e_{2,3}$	$e_{3,4}$
1	99.82	99.9	87.79
2	74.99	99.62	79.99
3	74.99	99.98	79.99
4	86.03	99.88	99.79

表 14 総収入の変化量

料金収入	インセンティブの合計	インセンティブの合計 (固定割合の場合)
594551.8	25592.16(4.3%)	33943.98(5.7%)

6. 考察

様々な突発的な事象を表した道路モデルを用いてシミュレーションを行った結果、突発的事象による道路状況の変化においてもインセンティブの金額を適切に設定することで交通量をコントロールできることが確認できた。さらに、一定料金の場合と比べて提案手法のほうが変化後の交通容量に則した交通量にコントロールできており、さらにインセンティブの合計も小さかったため収入最大化を損なうことなくインセンティブの値を決めることができていたことがわかった。しかし、今回直線的な道路モデルを使用して計算を行ったためこれらは各区間の突発的事象による相互間の影響も表すことができるが、パラレルにリンクが存在するような複雑な道路モデルを想定する際には本提案を改良する必要がある。

7. まとめ

我々の研究グループでは需要分布に基づく料金決定手法を提案しており、本提案では、突発的な事象によって変化

する道路状況をもとにインセンティブの金額を計算し、そのインセンティブの金額を利用者に通知することで、交通量を動的に制御可能な料金更新手法を検討した。この方法を道路モデルを使用してシミュレーションを行い、道路管理者の総収入を最大化しながら道路を有効に活用できていることを確認した。今後は、使用した道路モデルをより現実に即した複雑な道路モデルに改良する必要がある。現実に即した道路モデルを改良することで、突発的な事象によって変化する道路状況がさらに複雑になることが考えられる。さらに、本提案ではインセンティブを用いた払い戻し料金の決定を行ったが、ペナルティーを用いた料金決定方法や、インセンティブとペナルティーの両方を使用する料金決定方法との比較も行う必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K00146 および公益財団法人 I-O DATA 財団の助成による成果である。

参考文献

- [1] 一般財団法人自動車検査登録情報協会. 自動車保有台数推移表. <https://www.airia.or.jp/publish/statistics/trend.html>.
- [2] 国土交通省道路局. 渋滞の現状と施策体系 (2018 年 8 月 8 日閲覧). <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tdm/Top03-01-01.html>.
- [3] 太田 勝敏. 交通需要マネジメント (tdm) の展開とモビリティ・マネジメント. IATSS Review, Vol.31, No.4, pp.303-309, March 2007.
- [4] 金森 亮, 新井 秀幸, 山本 俊行, 森川 高行. 道路課金政策における課金収入再分配に関する研究. 土木学会論文集 D3, volume 67, pages L673-L681, 2011.
- [5] Hai Yang, Wei Xu, Bing-Sheng He, Qiang Meng. Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.18, No.2, pp.157-175, April 2010.
- [6] 国土交通省. 諸外国における高速道路料金の動向 (2018 年 8 月 8 日閲覧). <http://www.mlit.go.jp/common/000163956.pdf>.
- [7] 国土交通省. ETC の利用状況 (速報). (2018 年 8 月 8 日閲覧). <http://www.mlit.go.jp/road/yuryo/riyou.pdf>.
- [8] 川上 朋也, 増田 健一, 柴田 直樹, 伊藤 実. ロードプライシングにおける需要分布に基づく料金決定手法の提案. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム論文集, Vol., pp.934-940, 2017.
- [9] 吉田 菜葉, 川上 朋也, 柴田 直樹, 伊藤 実. 事前予約制ロードプライシングにおけるキャンセルを考慮した料金決定方法の検討. 第 26 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pages 191-193, oct 2018.
- [10] 川上 朋也, 柴田 直樹, 伊藤 実. 需要分布に基づくロードプライシングの動的環境における検証. 第 27 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pages 285-289, nov 2019.
- [11] 土木学会. 道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編利用者均衡配分の適用に向けて. 土木学会, August 2003.
- [12] 井上 博司. 連続流体モデルによる混雑したネットワーク交通流の動的シミュレーション手法. 土木学会論文集, volume 1997, pages 85-94, July 1997.
- [13] 久井 守. 交通流のモデリングと信号制御. 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.193-198, March 2002.
- [14] 塚田 悟之, 高田 邦道. 路側放送による道路交通情報の提供実態. 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, pages 823-824, September 2004.
- [15] Michael R. Garey, David S. Johnson. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, chapter Appendix: A List of NP-Complete Problems, page 216. W. H. Freeman and Company, 1979.