

需要分布に基づくロードプライシングにおける 計算量削減とミクロ交通シミュレーションによる評価

村田 航希^{1,a)} 山本 規吉 川上 朋也¹

受付日 2021年5月10日, 採録日 2021年11月2日

概要: 交通渋滞を低減させるためにさまざまな種類のロードプライシングが提案され、各国で利用されている。ロードプライシングには現在の道路の状態に対応して利用料金をリアルタイムに設定する方式もあり、道路資源の有効活用が期待されている。そのロードプライシングの中でも、事業者が需要分布に基づいて利用料金の決定と提示を事前に行う方式について、本研究では検討を行う。本研究の提案手法では圧縮行格納方式を用いて、従来方式から計算量を削減する。提案手法は実際の計算機を用いた実験でも計算時間の削減を確認し、高精度なミクロ交通シミュレータによる評価においても、決定料金の有効性を確認した。

キーワード: 高度道路交通システム (ITS), 有料道路, 最適化問題, 交通制御, 疎行列圧縮

Complexity Reduction and Evaluation in Micro Traffic Simulation for Road Pricing Based on Demand Distribution

KOKI MURATA^{1,a)} NORIYOSHI YAMAMOTO TOMOYA KAWAKAMI¹

Received: May 10, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: Various types of road pricing have been proposed and used in various countries to reduce traffic congestion. Road pricing also includes a method of setting the billing amount in real time according to the current road conditions, and effective utilization of road resources is expected. In this paper, the authors propose a method in which the business operator decides and presents the prices in advance based on the demand distribution. The proposed method employs compressed row storage and reduces the amount of calculation. The authors confirmed that the proposed method can reduce the calculation time also in an environment that has a real computer. In addition, the authors confirmed the validity of the determined prices in micro traffic simulation.

Keywords: intelligent transportation system (ITS), toll road, optimization problem, traffic control, sparse matrix compression

1. はじめに

現在、渋滞による時間とエネルギーの浪費は世界中で多くの社会損失を生んでいる。日本のみで考えても、渋滞による損失額は年間 11.6 兆円であり、国民 1 人あたりで換算しても年間 9 万円の損失を生んでいることになる [1]。今後、新興国での自動車数増大により、さらなる悪化が推測される。

渋滞問題を解決するために、ロードプライシングの仕組みが世界各国で研究、導入されている [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]。ロードプライシングは、特定の道路や地域、時間帯における自動車利用者に対して課金をすることにより、自動車利用の合理化や交通行動の転換を促し、自動車交通量の抑制を図る施策である。ロードプライシングには課金の対象や料金決定の方式によってさまざまな種類があり、実際の混雑状態に応じて料金を設定することで、道路の利用効率の向上が期待される。しかし、既存研究では、固定料金制の場合には適切な料金の設定が困難であること、利用需要に応じた収益の最大化が困難であることが問題点であり、変

¹ 福井大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui
910-8507, Japan

^{a)} mf210750@u-fukui.ac.jp

動料金制では、利用者が通行料金を事前に把握できず、利用計画が困難であること、エリア課金では特定の道路の混雑に対応することができないことが問題点であった。そこで筆者らはロードプライシングの中でも、出発地、到着地、時間帯ごとの道路利用の需要分布を事前に把握できる環境を想定し、道路事業者がその需要分布に基づいて料金の決定と提示を行う手法を提案した [9]。

文献 [9] では需要分布に基づく道路利用モデルを設計し、料金決定の最適化問題として差分進化法を用いて計算を行う。また、適切な利用料金が計算により設定され、道路資源を有効に活用できることを流体モデル [10], [11] のマクロ交通シミュレーションによって確認したが、提案手法の評価にマクロ交通シミュレーションを用いていたために現実に即したシミュレーションが行えていないことを解決すべきだとしていた。これらを解決するために、筆者らは車両の動きを高精度に再現するミクロ交通シミュレーションによっても、従来手法で決定される料金の有効性を確認している [12]。また、道路状況に応じて料金を変動させる仕組みはダイナミックロードプライシング (Dynamic Road Pricing, DRP) と呼ばれ、リアルタイムかつ効率的に道路交通量を制御できるが、文献 [9] の手法では料金決定の過程で出発地、到着地、時間帯のすべての組合せを探索対象としており、料金決定のための計算量が多いことも問題点としていた。計算量は道路モデルの規模によって指数的に増大するため、大規模な道路環境では料金決定までの時間が特に長大化する。決定、提示された料金とリアルタイムな道路交通状況に差が生じると、適切かつ効率的な道路利用の障害となる。

そこで本研究では、大規模な道路環境でのダイナミックロードプライシングの実現を目指し、従来手法における計算量削減手法を提案する。提案手法では圧縮行格納方式 (Compressed Row Storage, CRS) を用いて決定対象の料金数を削減し、大規模な道路環境においても料金決定までの計算時間を短縮する。また、提案手法によって決定された料金は先行研究と同様、マクロ交通シミュレーションとミクロ交通シミュレーションの両方で評価する。ミクロ交通シミュレーションには汎用的なミクロ交通シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) [13] を用い、実装した評価システムについても述べる。

以降、想定する需要分布に基づくロードプライシングについて 2 章で述べる。3 章では提案する計算量削減手法について述べ、4 章では計算量削減における提案手法の評価について述べる。5 章では提案手法による決定料金の交通シミュレーションによる評価について述べ、6 章で本論文をまとめる。

2. 需要分布に基づくロードプライシング

筆者らは予想される混雑状況に応じて通行料金を設定

し、利用者へ事前に提示する仕組みとして、需要分布に基づくロードプライシングを提案している [9]。本研究でも文献 [9] と同様の環境と問題設定を想定し、以降で説明する。

2.1 想定環境

本研究では、道路事業者が事前に出発地、目的地、時間帯ごとの利用需要の分布を大まかに把握できる環境を想定する [14]。利用需要の分布を大まかに把握する方法の一例としては ETC があげられ、その過去の記録から需要分布を形成することが可能となる。ここでの利用需要とは、道路の利用料金に対する利用者数 (車両数) 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数 (交通容量) があらかじめ定められているものとする。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。

本研究では各利用需要に対する利用料金を算出、出力し、利用者へ事前に提示するシステムを想定する。出力される料金は全利用時間帯において各道路区間の可能交通容量を超過しないという制約のもと、道路事業者の総収入を最大化する。

2.2 定式化

本研究の想定環境として、各利用需要に対する最適な利用料金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を行う。

2.2.1 入力

入力は、道路、利用者 (車両)、および需要分布から構成されている。各入力について以下に説明する。

- 道路

道路網は $G = (V, E)$ で表され、道路網に存在する出入口 (ゲート) を $v_i \in V$ とし、 v_i, v_j ゲート間の道路区間 (セグメント) を $e_{i,j} \in E$ とする。また、セグメント $e_{i,j}$ を利用できる車両の最大数 (交通容量) を $c_{i,j}$ とし、時刻 $t \in T$ に道路区間 $e_{i,j}$ を利用する利用者の数 (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) を表し、利用需要や料金決定の対象の時間帯となる。実際の道路では通勤時間帯に都市部へ向かう道路が混み、帰宅時間帯に都市部外の道路が混むなど、時間帯によって利用需要が大きく変わる場合に設定する。図 1 はゲート $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ でタイムスロット $T = \{1, 2, 3, 4\}$ の有料道路の例を示している。図 1 は 1 方向の道路を示し、破線は各ゲートの一般道路からの入り口と一般道路への出口を示している。

- 利用者

各利用者は出発ゲート $v_s \in V$ 、到着ゲート $v_g \in V$ および出発時刻 $t_s \in T$ を持つ。また、その経路のため

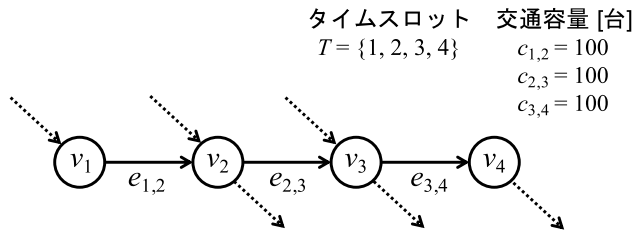


図 1 有料道路の例

Fig. 1 An example of road networks.

に有料道路を利用するかどうかの基準となる料金の情報も持つ。これらの情報を集約したものが利用需要である。

● 需要分布

出発ゲート v_i と到着ゲート v_j によって一意に決定される最短経路を $R(i, j)$ とする。また、出発時刻 t で経路 $R(i, j)$ を利用したいユーザの数 (需要) は $N_{i,j,t}$ 台とし、価格 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 $R(i, j)$ 、価格 $p_{i,j,t}$ の場合、予測される総利用者数は $(1 - F_{i,j,t}(p_{i,j,t}))N_{i,j,t}$ 台となる。

2.2.2 出力

本研究では出力として、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。本研究では最初に各時刻 t 、各経路 $R(i, j)$ の料金 $p_{i,j,t}$ を距離に応じて設定した後、料金の最適化を行う。ここでの距離は各経路に含まれるセグメントの長さの和であり、最適化前の料金の初期値に影響する。したがって、例として一部のエッジを共有する長い経路 R1 と短い経路 R2 があった場合には R2 の方が安くなる。なお、実際の有料道路では利用するかどうかの利用者の判断には利用料金だけでなく、利用した際の移動時間や一般道路を利用した場合との移動時間の差なども影響する。ただし、本研究では有料道路が渋滞しないことを料金決定の制約条件とする。そのため、利用者は標準的な時間で移動できると想定し、その移動時間を考慮したうえで、有料道路を利用するかどうかをその料金のみによって判断するものとする。

2.2.3 制約条件

本研究では、すべての道路区間で交通容量を超えないことを前提としている。したがって、制約として、すべての時刻 t と道路区間 $e_{i,j}$ において、つねに以下の条件を満たす必要がある。

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

2.2.4 目的関数

出発時刻 t に経路 $R(i, j)$ を利用するすべての利用者からの収入は $(1 - F_{i,j,t}(p_{i,j,t}))N_{i,j,t}p_{i,j,t}$ となっている。この研究では、道路事業者の利益を最大化するために、次の目

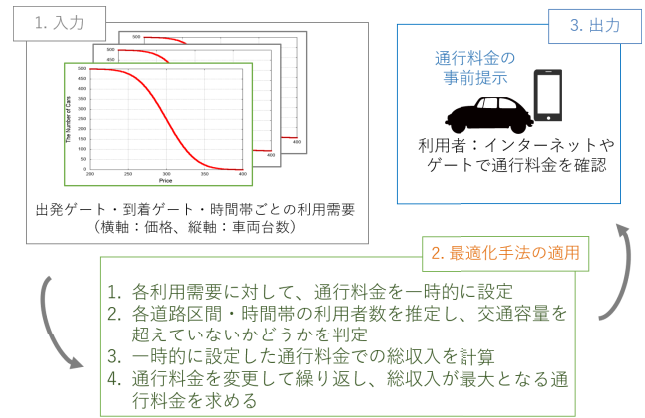


図 2 料金決定手法の流れ

Fig. 2 Process flows to determine prices.

的関数を使用してすべての経路と出発時刻における利用者からの収入を最大化する。

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

2.3 料金決定の流れ

本研究の問題設定では、それぞれの経路 $R(i, j)$ と出発時刻 t に対する需要分布が必要である。したがって、各時刻、各経路の組合せの数だけ必要となる需要分布の数は、最大で、各道路が片方向の場合は $|V|C_2|T|$ 、双方向の場合は $2|V|C_2|T|$ 必要となる。ここで、 $|V|$ はゲートの数を表し、 $|T|$ はタイムスロットの数を表す。たとえば、双方向で各経路の価格 $p_{i,j,t}$ を $150 \leq p_{i,j,t} < 450$ の範囲かつ 1 単位で決定する場合、各時刻、各経路に料金を設定する場合の料金の組合せの数は最大で $300^{2|V|C_2|T|}$ 通りとなる。このように、各時刻、各経路に料金を設定する場合の組合せの数はタイムスロット数、経路数、料金数によって大きくなっていく。

本研究では、問題設定における組合せ最適化を行う。料金決定の流れを以下と図 2 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、各時間の利用者数をセグメントごとに予測し、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の組合せを求める。

2.4 最適化手法の適用

本研究では料金決定のための組合せ最適化を行い、文献 [9] では差分進化法を用いている。差分進化法は Storn らによって提案された進化的アルゴリズムである [15], [16]。差分進化法では探索空間内にランダムに生成した個体から

集団を構成し、各個体をほかの個体と交差させ突然変異個体を生成する。生成した突然変異個体の評価値が元の個体の評価値より優れている場合にそれらを置換することで、最適解を求める。

DEは、変異個体を生成するために使用される式に応じて $DE/best/1$ や $DE/rand/1$ などの形式を持つ。この論文では、大域探索性と局所探索性をあわせ持つといわれている $DE/rand-to-best/1$ を用いる。

以下に差分進化法における処理の流れを示す。

手順 1: 世代 $G = 0$ として初期個体を N_{pop} 個生成し、初期集団を構成する。構成された集団内の個体をすべて評価する。

手順 2: 制約条件を満たす場合は終了する。主に世代数や関数評価数が制約条件として用いられる。

手順 3: 各個体 $x_i^{(G)}$ について以下の処理を行う。

(3.1) 集団よりランダムに3つの個体 $x_{r_1}^{(G)}$, $x_{r_2}^{(G)}$, $x_{r_3}^{(G)}$ を選択する。

(3.2) 以下の式より突然変異個体を生成する。

$$v_i^{(G)} = x_{r_1}^{(G)} + F \cdot (x_{best}^{(G)} - x_{r_1}^{(G)}) + F' \cdot (x_{r_2}^{(G)} - x_{r_3}^{(G)}) \quad (3)$$

(3.3) $x_i^{(G)}$ と $v_i^{(G)}$ を交叉し、 $u_i^{(G)}$ を生成する。

(3.4) $x_i^{(G)}$ と $u_i^{(G)}$ を比較し、評価値の優れている方を次世代の個体 $x_i^{(G+1)}$ とする。

手順 4: 手順 2 に戻る。

ここで、 F , F' は突然変異率であり、 $0 < F, F' \leq 1$ とする。

3. 計算量削減手法の提案

本研究では道路状況に応じて料金を変動させるダイナミックロードプライシングを想定し、実用的な時間で料金の決定、更新を実現するため、計算量削減手法を提案する。

3.1 先行研究における問題点

先行研究の文献 [9] では、合流と分岐を1つずつ持つ図 3 のノード (ゲート) 数 6 の道路で評価を行っている。一方、たとえば日本の首都高速道路で考えてみると [17]、首都高速道路内の高速中央環状線だけでも 19 の出入口があり、すべての首都高速道路にロードプライシング手法を適用すると、多くのノードを持つ道路環境で解を求める必要がある。道路のノード数の増加によって得られる道路区間の数

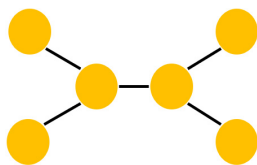


図 3 先行研究の道路モデル

Fig. 3 A road model in the previous study.

は各ノードの組合せの数となるため、道路区間は道路数増加により、指数関数的に増える。

想定する需要分布に基づくロードプライシングでは各経路で料金を探索し、適切な料金の組合せを結果として出力する。道路区間の大幅な増加によって計算量が増え、料金の出力までに時間がかかる。そのため、出力される料金とリアルタイムな状況に差が生じ、適切かつ効率的な道路利用の障害となる。

3.2 圧縮行格納方式を用いた高速化

本研究では道路を有向グラフとして扱う。たとえば、H型の片側走行のノード数7の道路モデルは図4の行列で表現できる。このとき、図4の行列は0を多く含む疎行列であり、圧縮行格納方式 (Compressed Row Storage, CRS) を用いて高速に演算を行える [18], [19]。提案手法では圧縮行格納方式を用いて、実際に車が走行できる経路のみを抽出する。先行研究で決定対象の料金数は (タイムスロット数) × (ゲート数) × (ゲート数) である一方、提案手法で決定対象の料金数は (タイムスロット数) × (実際に通る経路数) となる。実際に通る経路数は道路モデルの有効グラフに最短経路問題を適用し、得られた経路の数となる。決定対象とする料金数は影響し、料金決定のための計算時間が提案手法によって削減される。

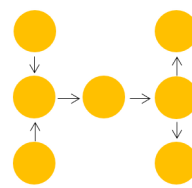
図4の例では、各ゲートからの最短経路は以下の行列 A で表される。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2 & 4 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 4 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

このとき、CRSを用いると、非零要素と各要素の行、列はそれぞれ以下の一次元配列 B , C , D で表される。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 3 & 4 & 1 & 3 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 4 & 3 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 6 & 7 \end{bmatrix} \quad (6)$$



$$\text{dists} = \begin{bmatrix} [0,1,0,0,0,0,0], \\ [0,0,0,1,0,0,0], \\ [0,1,0,0,0,0,0], \\ [0,0,0,0,0,1,0], \\ [0,0,0,0,0,0,0], \\ [0,0,0,0,1,0,1], \\ [0,0,0,0,0,0,0] \end{bmatrix}$$

図 4 道路モデルの行列表現

Fig. 4 Matrix representation of road models.

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 5 & 6 & 7 & 5 & 7 \end{bmatrix} \quad (7)$$

さらに、非零要素の行を示す配列 C は各要素が初めて出現するアドレスを記述し、以下の一次元配列 C' で表される。

$$C' = [1 \ 6 \ 10 \ 15 \ 18 \ 19] \quad (8)$$

提案手法では上記の配列 B , C' , D を用いて元の行列 A を表現し、料金決定のための入力とする。図 4 の例でタイムスロットが 1 の場合、決定対象の料金数は元の行列 A を用いた $7 \times 7 = 49$ から配列 B の長さ 19 へ削減できる。実在する道路では、各ゲートが相互かつ密接につながる網の目状の構造は少なく、多くが一定数以下の連結や分岐、合流で構成される。そのため、疎行列で表現される道路が多く、圧縮による計算量削減の効果が特に大きい。

4. 計算量削減における評価

圧縮行格納方式は行列の要素に 0 をほとんど含まない密行列に適用すると、単純に行列を計算するより時間がかかってしまう可能性がある。そのため、複数の道路モデルにおいて提案手法を評価する。

4.1 実験環境

まず、複数の道路モデルにおいて、決定対象の料金数が提案手法によってどの程度削減できるかを調べた。すべての道路モデルでタイムスロットを 4 に設定し、決定対象の料金数を算出した。道路モデルは図 5 に示したとおりの 5 つのパターンを用いる。(1) はノード数 4 の直線型、(2) はノード数 6 の直線型、(3) は合流分岐を考えたノード数 7 の H 型、(4) は分岐のみを考えた V 型、(5) はノード数 9 のラウンドアバウト型である。ラウンドアバウト型はパリの凱旋門など欧州に多く見られる円形交差点であり、実際に日本でも高速道路の IC に利用されているケースがあるため [20]、モデルパターンの 1 つとして用いる。道路の形状は直線と合流と分岐が主になっている。この 5 つのパターンはそれらの要素を実際の道路のように組み合わせているため、実験を行う道路のパターンとして十分であると考えられる。実際の多くの道路は両側走行であるが、各方向の経路は互いに独立で、並行的に計算できるため、ここではすべて片側走行の道路を想定する。次に、上記の道路パターン 1 から 5 を用いて、料金決定までの計算時間を測定した。先行研究と同じく最適化手法には差分進化法を用い、計算機の性能を表 1 に示す。計算時間の測定は決定対象の料金数を削減しない従来手法と提案手法で行い、各道路モデルでの 3 回の結果の平均値を算出した。また、タイムスロットはすべて 1 とした。

4.2 決定対象の料金数に関する結果

決定対象の料金数を表 2 に示す。表 2 の結果から、す

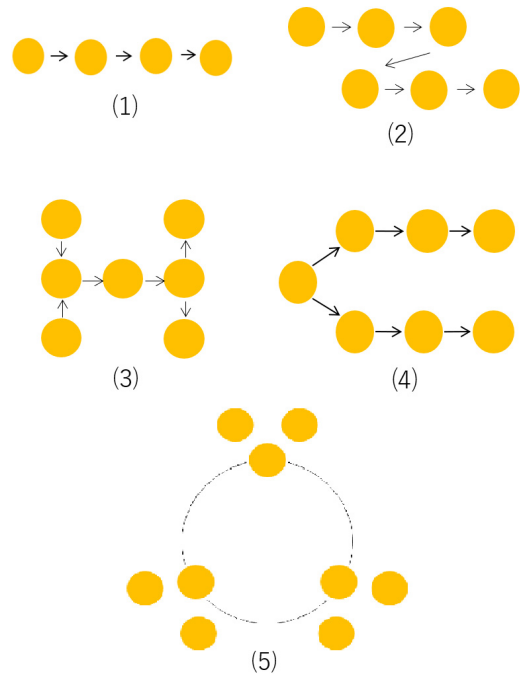


図 5 評価に用いた道路モデル

Fig. 5 Road models used for evaluation.

表 1 計算を行った機器

Table 1 The used computer.

CPU	AMD Ryzen 5 3600 (6 コア, 3.59 GHz)
メモリ	16.00 GB
ストレージ	SSD
OS	Windows 10 Home
使用言語	Python 3.7

表 2 各道路パターンにおける決定対象の料金数

Table 2 The number of prices to be determined for each road pattern.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
削減前	64	144	196	196	324
削減後	24	60	76	48	132

べての道路モデルにおいて料金数の削減が確認できる。同じ直線型の (1), (2) を比較すると (1) では 64 から 24 と 62.5% の削減, (2) では 144 から 60 と 58.3% の削減となる。直線型ではゲート数が短いほうがより決定対象の料金数を削減できることが分かる。また、(3) の H 型では 196 から 76 へ 61.3% の削減となる。直線型と比べ分岐、合流がある道路モデルでは、実際につながっていない経路が増えるため、ノード数が (2) の 6 より多い 7 ゲートであるにもかかわらず、(3) では (2) より多くの割合で料金数の削減となる。この考えより、(4) は分岐のみを考える道路であるが、つながっていないゲートの組合せが (3) と比べても多い。そのため 196 から 48 へ 76.5% という (3) と比べても高い削減効果を確認できる。また、(5) のような特殊な形の道路モデルであっても 324 から 132 へ 59.2% の削減を確認で

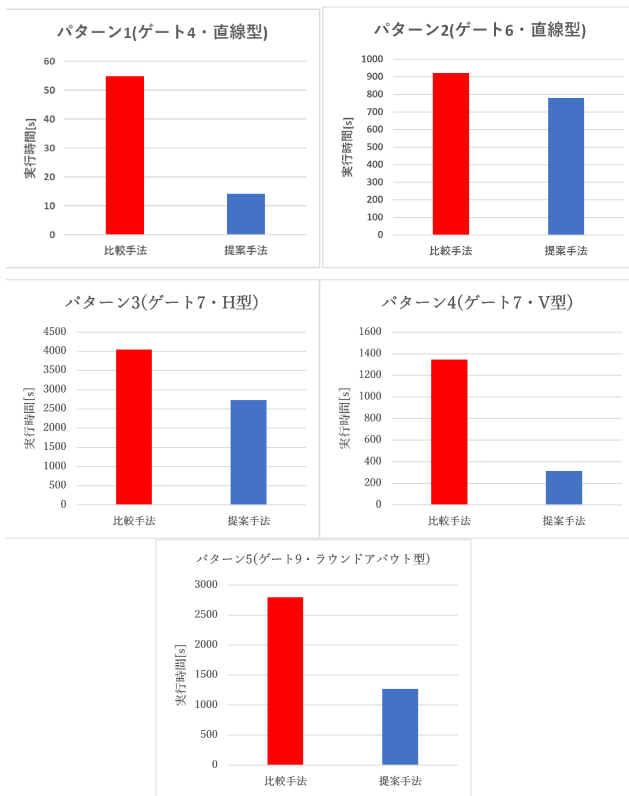


図 6 実験結果

Fig. 6 Experiment results.

き、さまざまな道路パターンで決定対象の料金数を削減できる。

4.3 計算時間に関する結果

料金決定までの計算時間に関する結果を図 6 に示す。パターン 1 では決定対象の料金数を削減する提案手法で 14.25 [s]、削減をしない比較手法では 54.88 [s] となった。また、パターン 2 では提案手法で 778.87 [s]、比較手法で 921.32 [s] となり、パターン 3 では提案手法で 2,730.43 [s]、比較手法で 4,040.09 [s] となった。パターン 4 では提案手法で 312.65 [s]、比較手法で 1,344.18 [s] となり、パターン 5 では提案手法で 1,267.52 [s]、比較手法で 2,792.30 [s] となった。以上の結果より、提案手法はさまざまな道路モデルにおいて計算量を削減できることを確認した。

5. 交通シミュレーションによる評価

本研究では提案手法で決定された料金を交通シミュレーションによって評価する。

5.1 評価システム

ロードプライシングにより交通渋滞などの対策を行っていくうえで、計画の策定・実施は大規模であり、かつ困難さがともなうため、1度決定してしまうと、変更するのは容易ではない。そこで、提案手法を用いた場合に、どのく

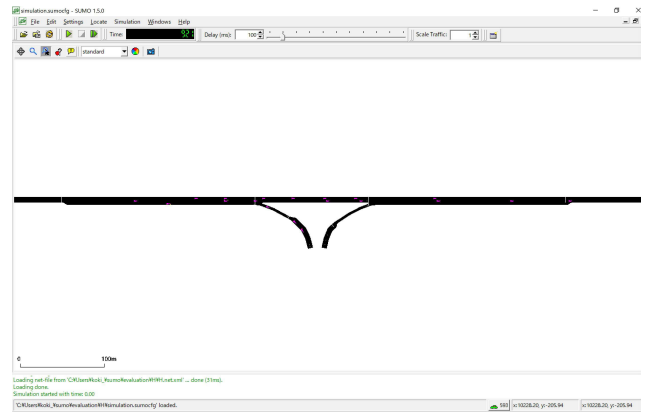


図 7 SUMO によるシミュレーションのスクリーンショット

Fig. 7 A screenshot of simulation by SUMO.

らいの効果があるかや、それによって別の箇所に問題が起きるかを事前にチェック、評価することが重要になっている。そのような状況のなか、近年の計算機の性能向上とともない、計算機による道路交通シミュレーションが交通渋滞対策の有効性や妥当性を評価するために広く用いられるようになり、世界各国で多くの道路交通シミュレータが提案、開発されてきた。道路交通シミュレータの開発において、最も重要となるのはシミュレーションモデルの構築であり、従来、シミュレーションモデルは大まかに「マクロ (Macro-scopic) = 連続流体近似モデル」「ミクロ (Micro-scopic) = 離散追従モデル」の 2 つに分類されてきた。近年ではこれらは進行方向の車両移動ロジックより、「交通流特性 (Q-K) タイプ」モデルと「追従 (C-F) タイプ」モデルに分類されている [21]。

筆者らは、先行研究では料金決定手法の評価に個別の車の動きを考慮しないマクロ交通シミュレーションにより評価を行っていた。そこで、本研究では、汎用的なミクロ交通シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) [13] を用いてロードプライシングの評価システムを実装し、提案手法により決定される料金の評価を行った。SUMO はドイツ航空宇宙センター (DLR) が開発しているオープンソースの交通流シミュレータで、車両を 1 台 1 台設定することによりシミュレーションを行える。SUMO によるシミュレーションのスクリーンショットを図 7 に示す。評価実験は直線型と H 型の 2 つの道路モデルで行っており、直線型の道路での評価実験の結果を 5.2 節に、H 型の道路での評価実験の結果を 5.3 節に示す。

5.2 直線型

5.2.1 実験環境

このシミュレーションでは、筆者らは、図 1 に示すように、4 つのゲートと 3 つのセグメントで構成される道路網を使用し、タイムスロットは $T = 1, 2, 3, 4$ に設定した。各区間の交通容量は 100 台となっている。また、道路は 1 方

向であり、各ゲート間の距離は10kmかつ1車線である。本研究では有料道路と各ゲートでの渋滞のみ観測しており、各ゲートから先の設定は行わないものとする。また、シミュレーションの継続中のすべての時間帯において、任意のゲートから残りの時間内に到達できるゲートまで道路の利用が発生するものとした。さらに、各ルートの需要台数は、6,000台(密)と3,000台(疎)の2つの場合で行い、どのルートも6,000台(密)もしくは3,000台(疎)の需要がある。需要分布には平均 $\mu = 500 \times dist$ 、分散 $\sigma^2 = \mu/5$ に従う正規分布の確率密度関数を用い、需要台数(ある料金で走りたいと思う車の数)が正規分布の確率密度関数に従う。ここで、 $dist$ はその需要分布を構成する利用者が走行する道路区間(セグメント)の数である。また、正規分布の確率密度関数を以下に示す。

$$f_{ijt}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ijt}^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{ijt})^2}{2\sigma_{ijt}^2}\right) \quad (9)$$

実験結果の妥当性を評価するために、比較対象として、各時刻、各経路に対して、それぞれ対応する正規分布の確率密度関数である需要分布の平均の価格 μ を料金として設定した場合の道路事業者の総収入と、各時間および各セグメントの走行車両数を求める。

差分進化法のパラメータとして、個体数(母集団のサイズ) N_{pop} は15であり、個体の変数の下限と上限はそれぞれ $x_{lb} = \mu - 3\sigma$ 、 $x_{ub} = \mu + 3\sigma$ であり、突然変異率 F 、 F' と交叉率 CR は両方とも0.7とした。また、以下の不等式が満たされた場合、解が収束したと見なし、探索を終了した。

$$\frac{\text{mean}(pop)}{\text{stdev}(pop)} > 10 \quad (10)$$

ここで、 $\text{mean}(pop)$ 、 $\text{stdev}(pop)$ は、それぞれ全個体の評価値の平均と標準誤差である。

一方、ミクロ交通シミュレーションによる評価には、5.1節で説明した交通シミュレータ SUMO を用いる。SUMOの各経路の車両数は、それぞれの手法によって計算された料金に基づいて、各タイムスロットごとに決定される。シミュレーション時間は24時間とする。直線型でのミクロ交通シミュレーションの評価指標は、全車両の平均速度(km/h)、全車両の走行時間のうち、平均速度が40km/h以下(本研究では渋滞と定義)となる時間の割合、総収入の3つである。

5.2.2 マクロ交通シミュレーションの結果

表3は各手法と環境に対する道路事業者の総収入を示している。また、表4は各時刻と各区間を走行する車両の数を示している。表4の括弧内の値は比較対象の車両数であり、下線の値は交通容量を超えていることを示す。

表4より、差分進化法で得られた解を利用料金として使用すると、交通容量に近い車両数が道路を利用できている

表3 決定した利用料金による総収入(直線型)

Table 3 The total income from the determined prices (straight type).

	疎	密
提案手法(百万円)	27.0	37.4
比較手法(百万円)	22.5	45.0

表4 各時刻・各区間を走行する車両数(直線型)

Table 4 The number of vehicles on each time and road segment (straight type).

(a) 疎			
t	$e_{1,2}$	$e_{2,3}$	$e_{3,4}$
1	99 (75)	76 (50)	44 (25)
2	96 (75)	94 (100)	69 (50)
3	83 (50)	95 (75)	96 (75)
4	45 (25)	78 (50)	98 (75)
(b) 密			
t	$e_{1,2}$	$e_{2,3}$	$e_{3,4}$
1	99 (150)	96 (100)	83 (50)
2	98 (150)	98 (200)	97 (100)
3	99 (100)	99 (150)	95 (150)
4	95 (50)	96 (100)	99 (150)

表5 各手法および環境ごとの結果(直線型)

Table 5 Results by methods and environments (straight type).

	提案(疎)	比較(疎)	提案(密)	比較(密)
平均速度(km/h)	79.62	82.08	77.13	46.13
渋滞の割合(%)	0.011	0.009	0.013	62.354

ことが分かる。一方で、各需要分布の平均値 μ を利用料金として使用すると、交通容量を超過したり、極端に空きが出る可能性があったりする。表3からは、比較手法の総収入は提案手法よりも高いが、表4に示すように、一部の区間で交通容量を超えている。本研究では渋滞を引き起こさないということを制約条件としているため、利益が高くて渋滞を起こしている比較手法は適切ではない。

5.2.3 ミクロ交通シミュレーションの結果

表5は各手法と環境での車両の平均速度と渋滞の割合を示している。総収入はマクロ交通シミュレーションを使用した場合と同じであるため、結果を表3に示す。

利用需要が少ない疎な状況において、提案手法は平均速度や渋滞の割合は比較手法と同程度である一方、総収入は比較手法の約1.2倍になっている。さらに、利用需要が多い密な状況においては、提案手法は総収入が比較手法の約83%となったが、比較手法では料金決定に道路の交通容量を考慮していないため、約62%で渋滞が生じており、平均速度も約31km/h低下している。マクロ交通シミュレーションと同様に、利益が高くて渋滞を起こしている比較手法は適切ではない。

表 7 各区間を走行する車両数 (H 型)

Table 7 The number of vehicles on each road segment (H-shaped).

	$e_{0,1}$	$e_{1,3}$	$e_{2,1}$	$e_{3,5}$	$e_{5,4}$	$e_{5,6}$
車両数 (台)	94 (187)	198 (450)	94 (187)	199 (450)	99 (187)	99 (187)

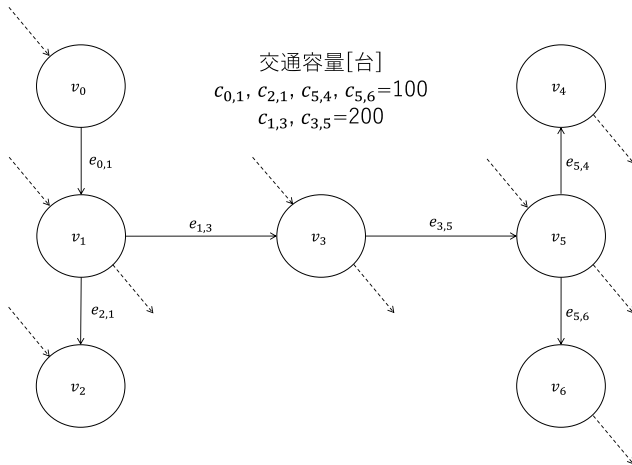


図 8 H 型道路

Fig. 8 An H-shaped road.

5.2.4 比較

マクロ交通シミュレーションとミクロ交通シミュレーションの結果を比較すると、密な場合の比較手法において、どちらもタイムスロット 2, 3 が特に混雑していたことが分かる。また、タイムスロット 4 では、マクロ交通シミュレーションの結果では渋滞が起きるといった結果だったが、ミクロ交通シミュレーションの結果では、平均速度が約 76 km/h と、渋滞しなかったことが分かった。これは、ミクロ交通シミュレーションでは区間の距離や車線数を設定するため、その設定の違いで結果に影響が与えられるからだと考えられる。他の環境および手法においてはこのような違いは見られなかったが、ミクロ交通シミュレーションでは平均速度や渋滞の割合というような視覚的に分かりやすい指標で提案手法と比較手法の評価が可能になっている。

5.3 H 型

5.3.1 実験環境

このシミュレーションでは、著者は、図 8 に示すように、7つのゲートと6つのセグメントで構成される道路網を使用し、タイムスロットは $T = 1$ に設定した。各区間の交通容量は v_0-v_1 間, v_2-v_1 間, v_5-v_4 間, v_5-v_6 間は 100 台, v_1-v_3 間, v_3-v_5 間は 200 台となっている。また、道路は 1 方向であり、各ゲート間の距離は 10 km である。車線数は v_0-v_1 間, v_2-v_1 間, v_5-v_4 間, v_5-v_6 間は 1 車線, v_1-v_3 間, v_3-v_5 間は 2 車線となっている。本研究では有料道路と各ゲートでの渋滞のみ観測しており、各ゲートから先の設定は行わないものとする。各ルートの需要台数

表 6 決定した利用料金による総収入 (H 型)

Table 6 The total income from the determined prices (H-shaped).

	提案手法	比較手法
総収入 (百万円)	22.0	41.2

は 3,750 台となっており、どのルートも 6,000 台 (密) もしくは 3,000 台 (疎) の需要がある。5.2 節と同様に平均 $\mu = 500 \times dist$, 分散 $\sigma^2 = \mu/5$ に従う正規分布の確率密度関数を用い、需要台数 (ある料金で走りたいと思う車の数) が正規分布の確率密度関数に従う。実験結果の妥当性を評価するために、比較対象として、各時刻、各経路に対して、それぞれ対応する正規分布の確率密度関数である需要分布の平均の価格 μ を料金として設定した場合の道路事業者の総収入と、各時間および各セグメントの走行車両数を求める。差分進化法のパラメータの設定および収束条件は、5.2 節と同様にする。

一方、SUMO を用いたミクロ交通シミュレーションによる評価の設定としては、SUMO の各経路の車両数を、それぞれの手法によって計算された料金に基づいて決定する。H 型ではタイムスロットが 1 つのため、24 時間の 1/4 である 6 時間 (21,600 秒) でシミュレーションを行ったが、SUMO 上での車の挿入が追い付かなかった。そこで今回は車の挿入が余裕をもって正しく行えるようにシミュレーション時間を 30,000 秒とする。H 型でのミクロ交通シミュレーションの評価指標は、全車両の平均旅行時間 (s/segment)、総収入の 2 つである。

5.3.2 マクロ交通シミュレーションの結果

表 6 は各手法に対する道路事業者の総収入を示している。また、表 7 は各区間を走行する車両の数を示している。表 7 の括弧内の値は比較対象の車両数であり、下線が引かれた値は交通容量を超えていることを示している。

表 7 より、差分進化法で得られた解を利用料金として使用すると、交通容量に近い車両数が道路を利用できていることが分かる。一方で、各需要分布の平均値 μ を利用料金として使用すると、交通容量が 100 台である区間 $e_{0,1}$, $e_{2,1}$, $e_{5,4}$, $e_{5,6}$ も、200 台である $e_{1,3}$, $e_{3,5}$ も交通容量を大幅に超過している。表 6 からは、比較手法の総収入は提案手法よりも高いが、表 7 に示すように、すべての区間で交通容量を超えている。本研究では渋滞を引き起こさないことを制約条件としているため、利益が高くても渋滞を起こしている比較手法は適切ではない。

表 8 各手法および環境ごとの結果 (直線型)

Table 8 Results by methods and environments (H-shaped).

	提案手法	比較手法
平均旅行時間 (s/segment)	456.3	1,147.4

5.3.3 ミクロ交通シミュレーションの結果

表 8 は、各手法での車両の平均旅行時間を示している。総収入はマクロ交通シミュレーションを使用した場合と同じであるため、結果を表 6 に示す。

提案手法は総収入が比較手法の約 53%となったが、ミクロ交通シミュレーションにより実際に車を動かしてみると、比較手法の 1 セグメントあたりの平均旅行時間は、提案手法の約 2.5 倍もの時間がかかっている。マクロ交通シミュレーションと同様に、利益が高くても渋滞を起こしている比較手法は適切ではない。

5.3.4 比較

マクロ交通シミュレーションとミクロ交通シミュレーションの結果を比較すると、提案手法において、マクロ交通シミュレーションでは交通容量を超えない範囲で道路を利用できており、ミクロ交通シミュレーションでもスムーズに、1 セグメントを約 7 分半で走行できていることが分かる。また、比較手法においては、マクロ交通シミュレーションではどの区間も交通容量を超過しており、ミクロ交通シミュレーションでも渋滞が発生しているために、1 セグメントを走行するのに約 19 分もかかっていることが分かる。このように、マクロ交通シミュレーションで渋滞すると予測される場合にはミクロ交通シミュレーションで実際に渋滞が起り、マクロ交通シミュレーションで渋滞しないと予測される場合にはミクロ交通シミュレーションでも実際に渋滞が起っていないことが分かる。

6. まとめ

本研究では利用需要が事前に得られる環境を想定し、需要分布に基づくロードプライシングに関する手法の提案と評価を行った。リアルタイムで各経路の利用料金を提示するためには実用的な計算時間で料金を決定する必要がある。疎行列圧縮方式を用いた提案手法により、実際には通らない経路の要素を除外し、さまざまな道路モデルで決定対象の料金数を削減できることを確認した。提案手法は実際の計算機を用いた料金決定までの時間においても評価し、計算時間が同様に削減されることを確認した。さらに、ミクロ交通シミュレータを用いた現実的な車両の動きでも、提案手法が交通渋滞を低減できることを確認した。

今後の課題としては、実際の高速道路の規模やダイナミックロードプライシングを想定した環境で実験し、提案手法による利用料金や計算時間が実用的かどうかの検証があげられる。このとき、実際の道路では双方向かつ目的地まで複数の経路が存在する。提案手法で用いた疎行列圧縮

方式の効果をより高めるため、道路を複数のグラフで分割して表現し、並列計算を可能とするなども今後考えられる。また、本研究では事前に得られる需要分布として正規分布を与えているため、実際の道路に即した需要分布を用いて検証することも今後の課題の 1 つとしてあげられる。その際、変動的な料金設定により今までの需要分布が変化する可能性もあるため、その対応を行うことも考えられる。さらに、カーブやサグなどの道路の形状、レーン数など、マクロ交通シミュレーションで考慮されていない情報に基づいて利用料金を補正し、渋滞を低減させることも考えられる。

謝辞 本研究の一部は福井大学研究育成経費の助成による成果である。

参考文献

- [1] 国土交通省道路局：渋滞の現状と施策体系，入手先 (<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tdm/Top03-01-01.html>) (参照 2020-10-13)。
- [2] Rouhani, O.M.: Road Pricing: An Overview, *MPRA Paper*, No.59662, pp.1–19 (2014)。
- [3] 王 曉虎：シンガポールの都市形成とプライシング政策，大阪産業大学経営論集，Vol.16, No.1, pp.55–82 (2014)。
- [4] 中村実男：ロンドンにおける道路混雑問題と混雑対策の展開：ロード・プライシングの導入を中心に，*明大商學論叢*，Vol.100, No.4, pp.17–28 (2018)。
- [5] 今西芳一，内山直浩，大瀧逸朗，中梯 諭，根本敏則：料金体系変更による社会的余剰への影響：首都高の距離別料金導入をケーススタディとして，*計画行政*，Vol.39, No.2, pp.49–55 (2016)。
- [6] 高木良太，円山琢也，溝上章志：エリア課金の最適設計問題：課金領域・レベルの決定アルゴリズムの構築と適用，*土木学会論文集 D3*，Vol.67, No.5, pp.L1233–L1242 (2011)。
- [7] 円山琢也：領域形状に着目した次善混雑課金の政策分析，*応用地域学研究*，Vol.20, pp.13–22 (2016)。
- [8] 井ノ口弘昭，秋山孝正：群知能技術を用いた都市高速道路の料金設定方法の提案，*交通工学論文集*，Vol.5, No.4, pp.A.18–A.23 (2019)。
- [9] 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*，pp.934–940 (2017)。
- [10] Hong, S.Y., Lee, C., Chung, S.B. and Kho, S.Y.: Analysis of Two-Fluid Model Using GPS Data, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.6, pp.560–572 (2005)。
- [11] Dixit, V.V.: Behavioural Foundations of Two-Fluid Model for Urban Traffic, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.35, pp.115–126 (2013)。
- [12] Murata, K. and Kawakami, T.: Evaluation of a Road Pricing Method Based on Demand Distribution in Micro Traffic Simulation, *Proc. 3rd IEEE International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle 2021)*, pp.257–262 (2021)。
- [13] Institute of Transportation Systems: SUMO – Simulation of Urban MObility, available from (<http://sumo.dlr.de/>) (accessed 2020-08-24)。
- [14] 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 (2003)。
- [15] Storn, R. and Price, K.: Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution, *Proc.*

IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp.842–844 (1996).

- [16] Storn, R. and Price, K.: Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol.11, No.4, pp.341–359 (1997).
- [17] 首都高速道路株式会社：首都高道路交通状況マップ，入手先 (<http://search.shutoko-eng.jp/rtmap.html>) (参照 2021-02-18).
- [18] 岡田真幸，櫻井鉄也，寺西慶太：近似係数行列に対する疎行列用直接解法を用いた前処理，*日本応用数学会論文誌*，Vol.17, No.3, pp.319–329 (2007).
- [19] 笹岡 岳，仲渡文成，鈴木 智，河村 隆：疎行列圧縮格納方式を用いたモデル予測制御の演算効率化に関する研究，第 61 回自動制御連合講演会講演論文集，11F1, 4 pages (2018).
- [20] 国土交通省：第 1 回ラウンドアバウト検討委員会，ラウンドアバウトの現状，入手先 (<http://www.mlit.go.jp/road/ir-council/roundabout/pdf01/4.pdf>) (参照 2021-02-18).
- [21] 王 維恩：道路交通シミュレーションに用いる車両走行モデルの構築に関する研究，博士論文，電気通信大学 (2007).



村田 航希

2021 年福井大学工学部電気電子情報工学科卒業。現在，同大学大学院工学研究科博士前期課程に在学中。高度交通システムに関する研究に従事。



山本 規吉

2021 年福井大学工学部電気電子情報工学科卒業。高度交通システムに関する研究に従事。



川上 朋也 (正会員)

2005 年近畿大学理工学部経営工学科卒業。2007 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同研究科特任研究員等を経て，2020 年より福井大学大学院工学研究科講師，現在に至る。情報科学博士 (2013 年 3 月，大阪大学)。分散システム，ルールベースシステム，ストリームデータ処理に関する研究に従事。IEEE 会員。