

# 需要分布に基づくロードプライシングにおける 分割計算手法の検討

村田 航希<sup>1,a)</sup> 川上 朋也<sup>1</sup>

**概要：**交通渋滞を低減させるために様々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。ロードプライシング手法については、道路事業者が需要分布に基づいて事前に価格を決定・提示する環境での手法を筆者らは提案している。本論文では、価格を決定するまでの計算量を減らすための分散計算方法を提案する。提案手法は元の道路モデルを複数の道路モデルに分割し、各道路モデルの価格を並行して決定する。提案手法により、実際のコンピュータを用いた計算量と計算時間が短縮されることを確認した。

**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

## 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 [2-8]。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。図 1 は (a) 課金方式と (b) 料金変動の例を示す。さらに、表 1 は諸外国におけるロードプライシングの導入事例を示す。課金方式については、距離課金や境界線 (コードン) 課金, エリア課金がある。距離課金は車両が走行した道路の距離に基づいて課金を行う方式である。ドイツやスイスの高速道路は一般的に無料になっているが、車両総重量が基準を超過している場合、走行距離に応じた重量貨物車課金が実施されている。一方でエリア課金は対

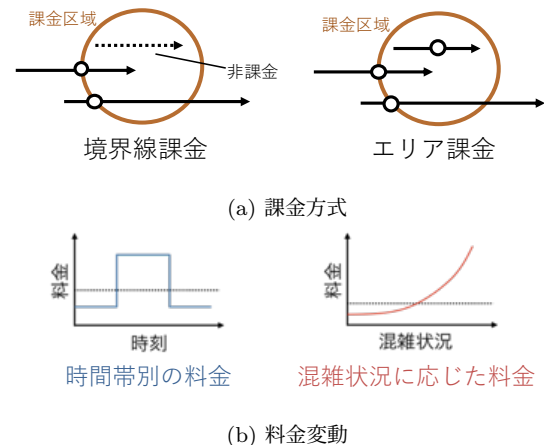


図 1 (a) 課金方式と (b) 料金変動.

象エリア内のすべての走行車両に対して課金を行う方式である。ロンドンでは、1997 年から 2000 年にかけて実施された調査で、混雑のピーク時の走行車両の平均速度が時速 15.9km しかないことが明らかになったため、2003 年に都市部を対象にエリア課金が開始された [9]。また、境界線課金は対象地域の境界線を越えて移動する車両を対象として課金する方法である。ノルウェーの「トールリング」は、収益性を向上させるために、対象地域に入る車両に対して課金が発生する。

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

<sup>1</sup> 福井大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui  
910-8507, Japan  
<sup>a)</sup> mf210750@u-fukui.ac.jp

表 1 諸外国におけるロードプライシング導入事例.

	シンガポール	ロンドン	ストックホルム
課金方式	境界線課金	エリア課金	境界線課金
導入時期	1975 年	2003 年	2007 年
導入目的	渋滞緩和	渋滞緩和, バス交通改善	渋滞緩和, 生活環境改善
課金額	時間帯による	固定	時間帯による

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 [10].

文献 [10] 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. 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 [10] 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み合わ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が問題点であった. 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.

そこで文献 [11] 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した. 文献 [11] の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した. しかし, この手法は道路モデルを表す行列が 0 要素の多い疎行列の場合には大きな効果を示していたが, 非零要素の多い密行列の場合には効果が軽減される.

そこで, 本研究では元の道路モデルを分割し, それらに対して CRS を用いる手法を提案する. この手法では, 元の密行列で表される道路モデルを CRS の効果が大きなくつつかの疎行列に分解し, さらに大規模で現実的な道路環境においても料金決定までの計算時間を短縮した.

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 章では圧縮行格納方式について述べ, 4 章では提案する計算量削減手法について述べる. そして 5 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, 最後に 6 章にて本論文をまとめる.

## 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,

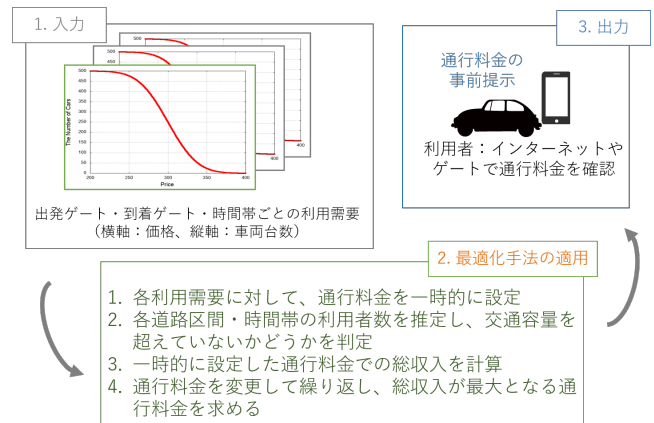


図 2 料金決定手法の流れ

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 [10]. この先行研究では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え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. 本研究でも文献 [10] と同様の環境と問題設定を想定する. 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み合わせを求める

## 3. 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. 筆者らは圧縮行格納方式 (Compressed Row Storage, CRS) を用いた計算量削減手法を提案している [11]. 例えば, H 型の片側走行のノード数 6 の道路モデルは図 3 の行列で表現できる. このとき, 図 3 の行列は 0 を多く含む疎行列であり, CRS を用いることで高速に演算を行える [12, 13]. 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

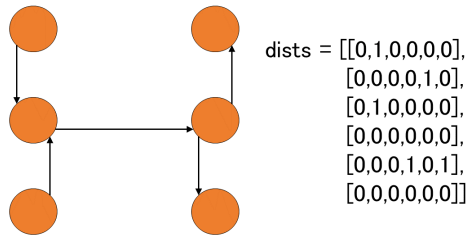


図 3 道路モデルの行列表現 (片側走行)

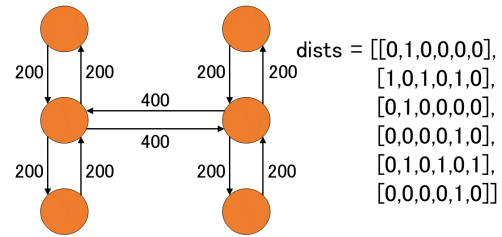


図 4 道路モデルの行列表現 (両側走行)

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 3 の例では、各ゲートからの最短経路は以下の行列  $A1$  で表される。

$$A1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 3 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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  $B1, C1, D1$  で表される。

$$B1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D1 = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 6 & 4 & 5 \\ 6 & 2 & 4 & 5 & 6 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに、非零要素の行を示す配列  $C1$  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  $C1'$  で表される。

$$C1' = [ 1 \ 5 \ 8 \ 12 ] \quad (5)$$

提案手法では上記の配列  $B1, C1', D1$  を用いて元の行列  $A1$  を表現し、料金決定のための入力とする。図 3 の例でタイムスロット (時間帯) の数が 1 の場合、決定対象の料金数は元の行列  $A1$  を用いた  $6 \times 6 = 36$  から配列  $B1$  の長さ 13 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. 計算量削減手法の提案

本研究では非零要素の多い密行列でも用いることのできる計算量削減手法を提案する。

### 4.1 先行研究における問題点

先行研究の CRS を用いた手法は行列に 0 を多く含む疎行列において有効であったが、非零要素が多い道路モデルではその効果は小さい。例として、図 3 の道路モデルを両側走行にした道路モデルとその行列を図 4 に示す。

図 4 の例では、各ゲートからの最短経路は以下の行列  $A2$  で表される。

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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  $B2, C2, D2$  で表される。

$$B2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D2 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 1 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 4 & 5 & 6 & 1 & 2 & 3 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 6 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$(10)$$

さらに、非零要素の行を示す配列  $C2$  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  $C2'$  で表される。

$$C2' = [ 1 \ 6 \ 11 \ 16 \ 21 \ 26 ] \quad (11)$$

提案手法では上記の配列  $B2, C2', D2$  を用いて元の行列

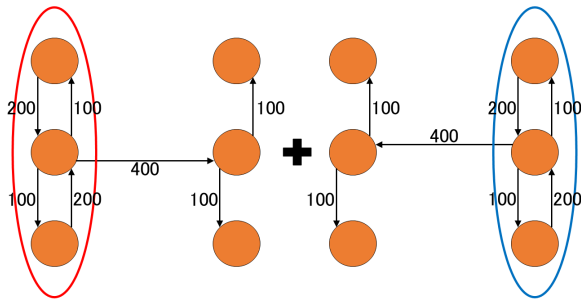


図5 図4の分割

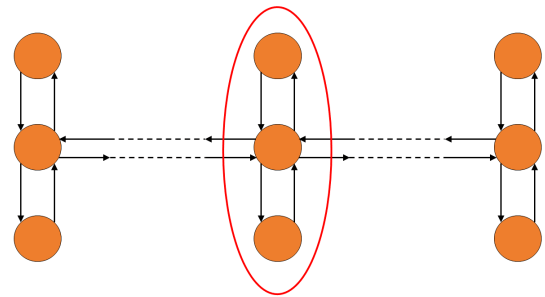


図6 評価に用いたH型道路モデル

A2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A2を用いた $6 \times 6 = 36$ から配列B2の長さへ削減される。このように片側走行であった図3の道路モデルでは配列が36から13に削減されていたのに対して図4の例では30までしか削減できていない。したがって非零要素の多い密行列では効果が小さくなってしまふことが先行研究の問題点であった。

#### 4.2 道路分割による計算量削減

本研究では4.1章で述べた問題点を解決するために、密行列である道路を分割していくつかの疎行列を作り、それに対してCRSを用いる。例として図4の分割を図5に示す。

図5において、左の道路モデルは元の道路モデルのリンクの内、赤丸で囲まれたノードから出発した際に利用するリンクで構成されている。一方で、右の道路モデルは元の道路モデルのリンクの内、青丸で囲まれたノードから出発した際に利用するリンクで構成されている。このように、元の道路モデルのノードをいくつかのグループに分け、それぞれのグループから出発した際に利用するリンクで分割後の道路モデルの構成を行う。また、分割後の道路モデルのそれぞれのリンクの交通量については、元の道路モデルのリンクの交通量をそのリンクを使用する分割後の道路モデルの数で割ったものを使用する。ここで、分割された道路は互いに独立している。したがって、各道路モデルの価格は複数のCPUやコンピュータで並行して決定できる。これは、大規模で現実的な道路環境においても、価格を決定する時間は分割された道路モデルの中の最大値まで短縮できることを意味する。

### 5. 計算量削減における評価

複数の道路モデルにおいて元の道路にCRSを用いる手法を比較手法とし、道路を分割してCRSを用いる提案手法を評価する。

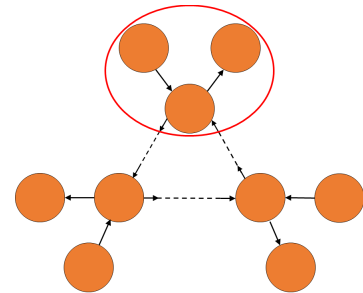


図7 評価に用いたラウンドアバウト型道路モデル

#### 5.1 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数を1に設定し、決定対象の料金数を算出した。道路モデルは図6, 7に示した通り、H型を拡張したものとラウンドアバウト型を拡張したものの2パターンを用いる。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インターチェンジ(IC)に利用されているケースがあるため[14]、モデルパターンの一つとして用いる。図6の赤丸で囲ったノードのグループを $n$ 個連結したモデルをH型( $n$ )モデルとする。同様に図7の赤丸で囲ったノードのグループを $n$ 個連結したモデルをラウンドアバウト型( $n$ )モデルとする。道路の形状は直線と合流と分岐が主になっている。この2つのパターンはそれらの要素を実際の道路の様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。分割後の道路モデルは、それぞれ赤丸で囲ったノードのグループから出発した際に利用するリンクから構成し、H型( $n$ )モデル、ラウンドアバウト型( $n$ )モデル共に $n$ 個の道路に分割する。

次に、上記の道路パターンを用いて、料金決定までの計算時間と世代数を測定した。先行研究[11]と同じく最適化手法には差分進化法[15,16]を用い、計算機の性能を表2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、タイムスロット数はすべて1とした。

表 2 計算を行った機器

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

## 5.2 H 型での結果

### 5.2.1 決定対象の料金数

決定対象の料金数を表 3 に示す。表 3 の結果から、H 型の道路モデルにおいて料金数の削減が確認できる。(2) においては道路を分割せずに CRS を用いる比較手法が 17% の削減だったのに対して、道路を分割してそれぞれに CRS を用いる提案手法では 53% の削減が行えている。また (7) においては比較手法が 5% の削減だったのに対して、提案手法では 74 ~ 80% の削減が行えている。このように、H 型の道路モデルにおいては道路の規模が大きくなるほど比較手法での削減効果は小さくなる一方で、提案手法での削減効果は大きくなることを確認した。

H 型 ( $n$ ) モデルにおける具体的な料金数としては削減前の料金数が  $9n^2$  個、比較手法の料金数が  $9n^2 - 3n$  個となっている。一方で提案手法の料金数は、最も料金数が多くなる外側のグループでの分割で  $(3n^2 + 13n - 4)/2$  個となっていて、最も料金数が少なくなる真ん中のグループでの分割では  $n$  が奇数の場合と偶数の場合で料金数が異なる。 $n$  が奇数の場合には  $(3n^2 + 32n - 11)/4$  個となり、 $n$  が偶数の場合には  $(3n^2 + 32n - 8)/4$  個となる。したがって元の料金数から比較手法では  $3n$  個削減しているのに対して、提案手法では料金数の最も多い分割でも  $(15n^2 - 13n + 4)/2$  個削減しており、削減数の差は  $(15n^2 - 19n + 4)/2$  個であることが分かる。

以上の結果より、提案手法は H 型の道路モデルにおいて料金数を削減できることを確認した。

### 5.2.2 料金決定までの計算時間

H 型 (3) の料金決定までの計算時間を図 8 に示す。比較手法では計算時間が約 380000 秒かかっていたのに対して、提案手法での計算時間は約 8000 ~ 30000 秒となっており、93 ~ 98% の計算時間削減が行えている。以上の結果より、提案手法は H 型の道路モデルにおいて料金決定までの計算時間を削減できることを確認した。

### 5.2.3 料金決定までの世代数

料金決定までの世代数を図 9 に示す。提案手法では約 2400 世代で各道路区間の可能交通容量を超過しない範囲

表 3 各道路パターンにおける決定対象の料金数 (H 型)

	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
削減前	36	81	144	225	324	441
比較	30	72	132	210	306	420
提案	17	28~31	42~48	56~68	73~91	90~117

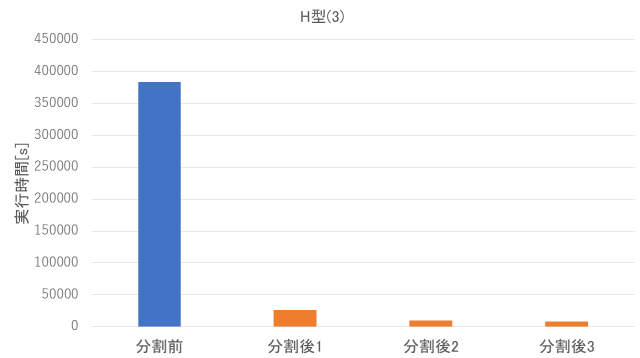


図 8 計算時間 (H 型)

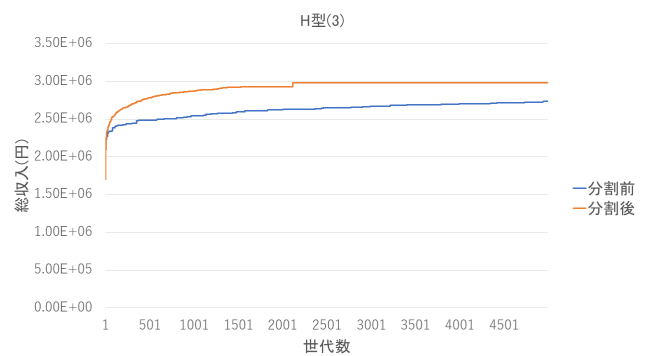


図 9 世代数による総収入 (H 型)

で、道路事業者の総収入が最大化され、料金が決定している。それに対して、比較手法では限度である 5000 世代に達しても収束せず、最適な料金決定が行われていない。以上の結果より、提案手法は H 型の道路モデルにおいて料金決定までの世代数を削減できることを確認した。

## 5.3 ラウンドアバウト型での結果

### 5.3.1 決定対象の料金数

決定対象の料金数を表 4 に示す。表 4 の結果から、ラウンドアバウト型の道路モデルにおいて料金数の削減が確認できる。(2) においては道路を分割せずに CRS を用いる比較手法が 62% の削減だったのに対して、道路を分割してそれぞれに CRS を用いる提案手法では 78% の削減が行えている。また (7) においては比較手法が 58% の削減だったのに対して、提案手法では 86% の削減が行えている。このように、ラウンドアバウト型の道路モデルにおいても道路の規模が大きくなるほど比較手法での削減効果は小さくなる一方で、提案手法での削減効果は大きくなることを確認した。

表 4 各道路パターンにおける決定対象の料金数 (ラウンドアバウト型)

	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
削減前	36	81	144	225	324	441
比較	14	33	60	95	138	189
提案	8	15	24	35	48	63

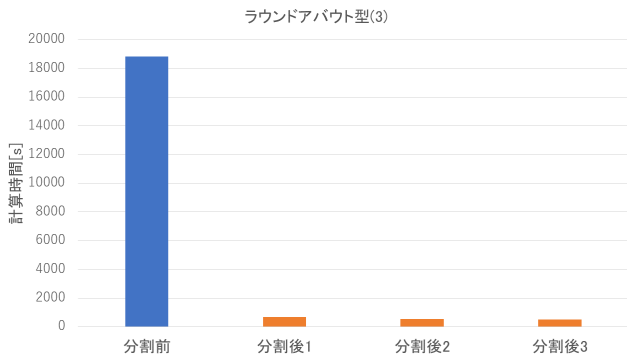


図 10 計算時間 (ラウンドアバウト型)

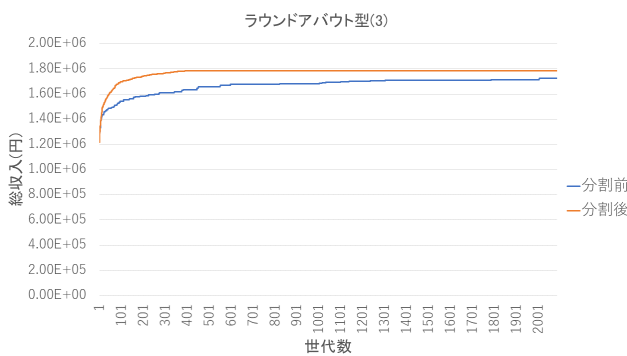


図 11 世代数による総収入 (ラウンドアバウト型)

ラウンドアバウト型 ( $n$ ) モデルにおける具体的な料金数としては削減前の料金数が  $9n^2$  個, 比較手法の料金数が  $4n^2 - n$  個, 提案手法の料金数が  $n^2 + 2n$  個となっている。したがって元の料金数から比較手法では  $5n^2 + n$  個削減しているのに対して, 提案手法では  $8n^2 - 2n$  個削減しており, 削減数の差は  $3n^2 - 3n$  個であることが分かる。

以上の結果より, 提案手法はラウンドアバウト型の道路モデルにおいて料金数を削減できることを確認した。

### 5.3.2 料金決定までの計算時間

料金決定までの計算時間を図 10 に示す。比較手法では計算時間が約 19000 秒かかっていたのに対して, 提案手法での計算時間は約 500 ~ 700 秒となっており, 約 97% の計算時間削減が行えている。以上の結果より, 提案手法はラウンドアバウト型の道路モデルにおいて料金決定までの計算時間を削減できることを確認した。

### 5.3.3 料金決定までの世代数

料金決定までの世代数を図 11 に示す。提案手法では約 500 世代で各道路区間の可能交通容量を超過しない範囲で, 道路事業者の総収入が最大化され, 料金が決定している。それに対して, 比較手法では約 2000 世代で料金が決定しており, 提案手法によって料金決定までの世代数を約 75% 削減できている。以上の結果より, 提案手法はラウンドアバウト型の道路モデルにおいて料金決定までの世代数を削減できることを確認した。

## 6. まとめ

本研究では需要分布に基づくロードプライシングに関する手法において, 計算量の削減を行った。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。元の道路モデルが密行列で疎行列圧縮方式の効果が小さくなってしまいう場合に, 分割を行い, それぞれの分割された道路モデルに疎行列圧縮方式を用いる提案手法により, 様々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や世代数においても評価し, 計算時間や世代数が同様に削減されることを確認した。

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挙げられる。また, 道路モデルの分割においても, 実際に存在する様々な形状の道路に適用させることができるように, アルゴリズムの一般化が必要である。

**謝辞** 本研究の一部は放送文化基金および「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業, JSPS 科研費 22K12009 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. <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. I.1233-I.1242 (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] Prud'homme, R. and Bocarejo, J. P.: The London Congestion Charge: A Tentative Economic Appraisal, *Transport Policy*, Vol. 12, No. 3, pp. 279-287 (2005).
- [10] 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).
- [11] 村田航希, 山本規吉, 川上朋也: 需要分布に基づくロー

- ドブライシングにおける計算量削減とマイクロ交通シミュレーションによる評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 63, No. 2, pp. 655–664 (2022).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/roundabout/pdf01/4.pdf> (参照 2021-02-18).
- [15] Storn, R. and Price, K.: Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution, *Proceedings of the 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).