

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

川上 朋也¹ 増田 健一² 柴田 直樹¹ 伊藤 実¹

概要: 交通渋滞を低減するためにさまざまなロードプライシングの仕組みが提案され, 各国で導入されている. 実際の混雑状況に応じて課金額をリアルタイムに設定するロードプライシング手法は, 道路の利用効率を高めることが期待できる. しかし, 利用者が道路の混雑状況から利用時の正確な料金を事前に把握することは困難であるため, 利便性に問題が生じる. そこで本論文では, 出発地・到着地・時間帯ごとに道路利用の大きな需要分布が事前に把握できる環境を想定し, 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手法を提案する. 提案する料金決定手法では需要分布に基づくモデルを設計し, 道路が渋滞しない範囲で事業者の総収入を最大化する料金を最適化手法により決定する. 本論文では特定の道路環境において, 提案手法により利用料金が適切に設定されることを確認した.

Proposal of a Price Determination Method for Road Pricing Based on Demand Distribution

Tomoya Kawakami¹ Kenichi Masuda² Naoki Shibata¹ Minoru Ito¹

1. はじめに

日本国内の自動車保有台数は2016年において約8,100万台であり, 年々増えている [1]. そのうち自家用乗用車は約6,100万台を占め, 世帯あたりの保有台数に換算すると1.064台となる [2]. 自動車保有台数が増えることで交通渋滞も増え, 時間やエネルギーの消費による経済損失, 環境汚染など, さまざまな社会問題を引き起こす.

交通渋滞を低減するための仕組みの一つとしてロードプライシングがあり, 各国で研究や導入が行われている [3-9]. ロードプライシングには課金の対象や価格決定の方式によってさまざまな種類があり, 実際の混雑状況に応じて価格をリアルタイムに設定することで, 道路の利用効率を高めることが期待できる. しかし, 利用者が混雑状況から正確な料金を事前に把握することは困難であるため, 計画性や利便性に問題が生じる.

そこで本論文では, 出発地, 到着地, 時間帯ごとに道路利

用の大きな需要分布を事前に把握できる環境を想定し, 道路事業者が需要分布に基づいて価格の決定と提示を行う手法を提案する. 提案する価格決定手法では需要分布に基づく道路利用モデルを設計し, 設計したモデルでは最適な価格決定は非線形問題で表される. また価格については, 各道路の交通容量を越えない範囲で, 事業者の総収入が最大となるように最適化手法により決定する. 本論文では特定の道路環境と最適化手法である差分進化法 [10, 11] を用いて, 提案手法により価格が適切に設定されることを確認した. また, 提案手法では極端な高価格による交通量の減少もなく, 道路資源を有効に活用できることも確認した.

2. ロードプライシングの現状

2.1 課金方式や料金変動による分類

ロードプライシングとは自動車による道路の利用に対して料金を徴収する行為のことである. 既存のロードプライシングは課金方式や料金変動によって分類できる. 課金方式と料金変動の例を図1に示す. また, 諸外国におけるロードプライシング導入事例を表1に示す.

課金方式については, 距離課金や境界線 (Cordon, コー

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

² 住友電気工業株式会社
Sumitomo Electric Industries, Ltd

表 1 諸外国におけるロードプライシング導入事例

Table 1 Introduction examples of road pricing in foreign countries.

	シンガポール	イギリス (ロンドン)	スウェーデン (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, バス交通の改善	渋滞緩和, 生活環境の改善
課金額	時間帯に応じて変動	固定	時間帯に応じて変動

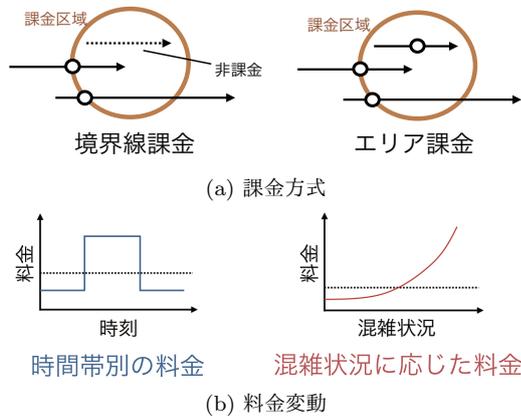


図 1 (a) 課金方式および (b) 料金変動

Fig. 1 (a) Pricing systems and (b) change of prices.

ドン) 課金, エリア課金がある [12,13]. 距離課金は車両の走行距離に基づいて課金する方式である. ドイツやスイスの高速道路は原則無料だが, 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, エリア課金は対象エリア内の全走行車両に対して課金する方式である. ロンドンでは 1997 年から 2000 年にかけて実施された調査から, 混雑ピーク時間帯における車両の平均速度が 15.9km/h しかないことが明らかとなり, 2003 年から都市部を対象としたエリア課金制度が導入された [14]. また, 境界線課金は対象エリアの境界線を跨ぐ走行車両に対して課金する方式である. ノルウェーのトールリングでは収益性改善のため, エリアに進入する車両に対して課金が発生する. ミラノのエコパスでは排ガス削減を目的として, 2008 年からこの課金方式が導入されている [15].

料金変動については, 固定料金のほか, 時間帯や混雑状況に応じた料金がある. 前述のロンドンにおける導入事例では, 当初, 平日の 7:00 から 18:30 の間に対象エリア内を走行, もしくは路上駐車した車両に対し, 5 ポンドの課金が設定されていた. 2005 年には課金額が 8 ポンドに引き上げられ, 2008 年には課金時間帯が 18:00 までと短縮されたと同時に, 課金エリアが拡大された. また, スtockホルムでは, 2006 年 1 月から 6 か月間にわたる試験的導入を経て, 2007 年 8 月より混雑税 (Congestion Tax) が正式に導入された [16]. 課金対象時間内にストックホルム市の対象エリア内に入出入りすると, 通行時間帯によって 3 段階に変化する課金がなされるが, 1 日当たりの課金額の上限が定

められている. スtockホルムの混雑税制度の特徴は, 時間帯別の課金を行っている点である. 通行時間帯にかかわらず課金額が一定であるロンドンに比べ, 混雑の激しい時間帯に高い課金を行うことで, 時間帯ごとの混雑外部費用の変化に対応している. 混雑状況に応じた料金の事例としては, 米国では HOT レーン (High Occupancy Toll Lane) の導入が進められている [17, 18]. 米国には代表的な道路混雑対策の HOV レーン (High Occupancy Vehicle Lane), 別名カープールレーン (Carpool Lane) があり, 「複数の人員が乗車する自動車」のために専用車線が設けられている. HOT レーンは料金の支払いを条件に「1 人乗り」に対しても HOV レーンの利用を認めるもので, すべての道路利用者に新たな選択肢を与える施策として, 高い支持を得ている.

2.2 問題点

ロードプライシングには, 距離や時間帯などによって通行料金を固定する固定料金制と, リアルタイムな混雑状況などによって通行料金を動的に変える変動料金制が考えられる. ここで, 道路環境の継続的かつ安定的な提供を考えると, 道路資源に対する道路事業者の収益を最大化することが望ましい. また, 一般道路の混雑を避けるため, できるだけ道路資源を活用し, 交通容量に近い台数を有料道路で受け入れることが望ましい. しかし, 固定料金制は適切な料金の設定が困難で, 道路事業者の収益を最大化することも困難である. 例えば利用需要に対して料金が高い場合, 閑散期に利用されず, 道路資源が無駄になる. 逆に, 利用需要に対して料金が低い場合, 繁忙期に重度の混雑が発生し, さまざまな社会問題を引き起こす. また, 変動料金制では実際の混雑状況に応じて価格をリアルタイムに設定することで, 道路の利用効率を高めることが期待できる. しかし, 利用者が混雑状況から正確な料金を事前に把握することは困難であるため, 計画性や利便性に問題が生じる.

3. 問題設定

本研究では, 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ロードプライシングの仕組みを提案する. 本章では本研究において設計するモデルについて述べる.

3.1 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することができる環境を想定する [19]。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のことを指す。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する。さらに、各車両は流体モデルに従って移動するものとする [20, 21]。

本研究では各利用需要に対する利用料金の算出・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。

3.2 定式化

本研究の想定環境において、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する。

3.2.1 入力

本研究における入力は、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（ゲート）を $v_i \in V$ 、頂点間の道路区間（セグメント）を $e_i \in E$ とする。また、セグメント e_i を利用可能な最大数（交通容量）を c_i 、時刻 $t \in T$ における e_i の利用者数（交通量）を n_{it} 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。

- 利用者

各利用者は、出発ゲート $v_s \in V$ 、到着ゲート $v_g \in V$ 、出発時刻 $t_s \in T$ をもつ。

- 需要分布

出発ゲート v_i 、到着ゲート 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_{ijt} 台、価格 x での需要の割合を表す需要分布を確率密度関数 $f_{ijt}(x)$ とする。 $f_{ijt}(x)$ の累積分布関数を $F_{ijt}(x)$ とすると、出発時刻 t で経路 $R(i, j)$ 、価格 p_{ijt} の場合に予測される総利用者数は $(1 - F_{ijt}(p_{ijt}))N_{ijt}$ 台となる。

3.2.2 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 に対して価格 p_{ijt} を決定する。利用者は入力として前述の出発ゲートと到着ゲート、出発時刻を事前に指定し、出力として得られた価格に基づいて、道路を利用するかどうかを判断する。

3.2.3 制約条件

本研究では、道路のすべてのセグメントで交通容量を越

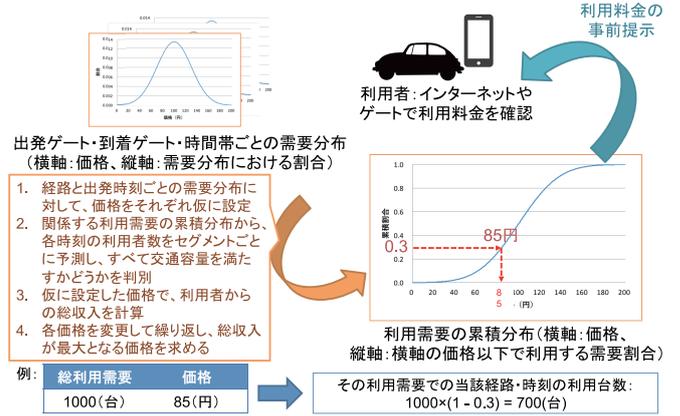


図 2 提案手法の流れ

Fig. 2 The procedure of the proposed method.

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 とセグメント e_i で満たす必要がある。

$$n_{it} \leq c_i \quad \forall e_i \quad \forall t \in T \quad (1)$$

3.2.4 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、 $(1 - F_{ijt}(p_{ijt}))N_{ijt}p_{ijt}$ 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利用者からの収入を最大化する以下を目的関数とする。

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

4. 需要分布に基づく価格決定手法の提案

4.1 提案手法の流れ

3章で述べた問題設定では、需要分布は経路 $R(i, j)$ と出発時刻 t ごとに必要となる。そのため最大で、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、 $|V|$ はゲート数を、 $|T|$ はタイムスロット数を表す。例えば、双方向で各経路の価格 p_{ijt} を $150 \leq p_{ijt} < 450$ の範囲かつ1単位で決定する場合、組合せは最大で $300^2|V|C_2|T|$ 通りとなる。

本研究では、3章の問題設定における組合せ最適化を行う。提案手法の流れを以下と図2に示す。

- (1) 経路と出発時刻ごとの需要分布に対して、価格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) 仮に設定した価格で、利用者からの総収入を計算
- (4) 各価格を変更して繰り返し、総収入が最大となる価格を求める

4.2 最適化手法の適用

Garey らは、Directed Two-Commodity Integral Flow

モデルが NP 完全問題であると述べている [22]. Directed Two-Commodity Integral Flow モデルは有向グラフにおいて 2 つの流体の流量を最適化する問題で、本研究の問題設定はさらに複雑である。そのため、本研究では最適化手法を適用し、最適となる各価格の近似解を現実的な計算時間で求める。適用可能な最適化手法には遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) や焼きなまし法 (Simulated Annealing, SA) があるが、本研究では差分進化法 (Differential Evolution, DE) を用いる。

4.3 差分進化法

差分進化法 (Differential Evolution, DE) は Storn らによって提案された進化的アルゴリズムである [10, 11]. DE は探索空間中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叉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 は突然変異個体の生成に用いる式の違いによって $DE/best/1$ や $DE/rand/1$ などの形式がある。本論文では大域探索性と局所探索性を併せ持つとされる $DE/rand-to-best/1$ を用いる。

以下に DE 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全て評価する。

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回数が制約条件として用いられる。

手順 3 各個体 $\mathbf{x}_i^{(G)}$ 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 $\mathbf{x}_{r_1}^{(G)}$, $\mathbf{x}_{r_2}^{(G)}$, $\mathbf{x}_{r_3}^{(G)}$ を選択する。

(3.2) 以下の式より突然変異個体を生成する。

$$\mathbf{v}_i^{(G)} = \mathbf{x}_{r_1}^{(G)} + F \cdot (\mathbf{x}_{\text{best}}^{(G)} - \mathbf{x}_{r_1}^{(G)}) + F' \cdot (\mathbf{x}_{r_2}^{(G)} - \mathbf{x}_{r_3}^{(G)}) \quad (3)$$

(3.3) $\mathbf{x}_i^{(G)}$ と $\mathbf{v}_i^{(G)}$ を交叉し、 $\mathbf{u}_i^{(G)}$ を生成する。

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

手順 4 手順 2 に戻る。

ここで、 F , F' は突然変異率と呼ばれるものであり、 $0 < F, F' \leq 1$ とする。

以下では、各手順について詳細に述べる。

初期個体の生成: 以下のような D 個の変数からなる個体を N_{pop} 個生成する。世代 $G = 0$ とすれば、

$$\mathbf{x}_i^{(0)} = \{x_{i,1}^{(0)}, x_{i,2}^{(0)}, \dots, x_{i,D}^{(0)}\}, i = 1, 2, \dots, N_{\text{pop}} \quad (4)$$

である。個体の変数は $[x_{\text{lb}}, x_{\text{ub}}]$ 内の一様乱数とする。ここで $x_{\text{lb}}, x_{\text{ub}}$ は最適化問題において各変数が取り得る下限

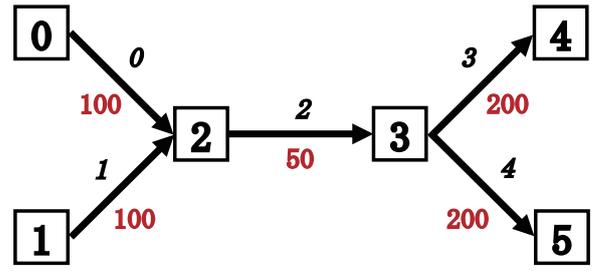


図 3 評価に用いた道路網

Fig. 3 Road network

と上限である。

突然変異: 集団内の個体 $\mathbf{x}_i^{(G)}$ から式 (3) を用いて突然変異個体 $\mathbf{v}_i^{(G)}$ を生成する。 r_1, r_2, r_3 はランダムに選んだ整数であり、 $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N_{\text{pop}}\}$, $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ である。

交叉: 突然変異個体 $\mathbf{v}_i^{(G)}$ と個体 $\mathbf{x}_i^{(G)}$ を交叉させ、交叉個体

$$\mathbf{u}_i^{(G)} = \{\mathbf{u}_{i,1}^{(G)}, \mathbf{u}_{i,2}^{(G)}, \dots, \mathbf{u}_{i,D}^{(G)}\}, i = 1, 2, \dots, N_{\text{pop}} \quad (5)$$

を生成する。ここで

$$\mathbf{u}_{i,j}^{(G)} = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,j}^{(G)} & \text{if } \text{rand}(0, 1) \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ \mathbf{x}_{i,j}^{(G)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

である。なお、 $j = 1, 2, \dots, D$ であり、 $\text{rand}(0, 1)$ は $[0, 1]$ 内の一様乱数である。また j_{rand} は $[1, D]$ からランダムに選んだ整数である。 $CR \in [0, 1]$ は交叉率と呼ばれる。

選択: 個体 $\mathbf{x}_i^{(G)}$ と突然変異個体 $\mathbf{v}_i^{(G)}$ を比較し、優良な個体を次世代の個体とする。目的関数 $f(x_i)$ を最大化する場合、

$$\mathbf{x}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{(G)} & \text{if } f(\mathbf{x}_i^{(G)}) < f(\mathbf{u}_i^{(G)}) \\ \mathbf{x}_i^{(G)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

とする。

5. 評価

5.1 評価環境

設計したモデルにおいて、第 4.3 節で述べた差分進化法を用いて道路事業者の総収入を最大化する利用料金を求める。本論文では図 3 で表されるゲート数 6、セグメント数 5 からなる道路網を用いて評価を行った。なお、図 3 の枝の上下に記述された値はそれぞれセグメントのインデックス、可能交通容量を表す。

本論文の実験では、単純化のため各車両は単位時間あたりに 1 セグメント走行するものとした。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可能なゲートに向かって道路の利用が発生するものとした。さらに、需要台数は全て 300 台とし、需要分布として、 $\mu = 300 * \text{distance}$, $\sigma^2 = 25$ に従う正規分布の生存関数を用いた。ここで、 distance はその需要分布を構成する利用者が走行する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。

$$f_{ijt}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ijt}^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{ijt})^2}{2\sigma_{ijt}^2}\right) \quad (8)$$

実験結果の妥当性を評価するために、比較対象として各需要分布に対する料金を $\mu + 2\sigma$ としたときの道路事業者の総収入と各時刻・各セグメントを走行する車両数を求めた。

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、以下の不等式を満たすとき解が収束したとみなし、探索を終了した。

$$\frac{\text{mean}(pop)}{\text{stdev}(pop)} > 10 \quad (9)$$

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偏差である。

5.2 実験結果

シミュレーション継続時間 $T = 3, 4, 5, 6$ とし、差分進化法をそれぞれ独立に 4 回試行した際の世代数と目的関数の評価値の関係を表すグラフを以下の図 4 に示す。また、それぞれ 1 回目の試行の結果である料金を採用した場合に、実際に各時刻において各セグメントを走行する車両数を以下の表 2 に示す。なお、表中の丸括弧内の値は比較対象の車両数であり、太字は可能交通容量を超過していることを表す。

図 4 より、各試行によりばらつきはあるものの、差分進化法の世代数が増加するにつれて目的関数の評価値である道路事業者の総収入が増加していることがわかる。また、表 2 より、差分進化法を用いて求めた解を料金として適用した場合、可能交通容量に近い車両数が道路を利用することがわかる。一方で、各需要分布に対する料金を $\mu + 2\sigma$ として適用すると、可能交通容量を超過してしまう場合や、極端に空きが出てしまう場合があることがわかる。

6. 考察

本論文における実験では、設計した多峰性の非線形最適化問題の解法として、メタヒューリスティクスである差分進化法を採用した。それにより求めた解である料金を適用した場合、最適化手法を用いずに適当に決定した料金を適用した場合よりも目的関数の評価値は優れており、また可能交通容量近くまで道路の利用台数を増加させることができるため、道路資源が有効に活用されることを確認できた。しかしながら、シミュレーション継続時間が長くなるにしたがって需要分布の数が増加するため、収束に至るまでの世代数も増加している。同様に、道路網がより複雑になった場合についても計算量が増え、厳密解に近い理想的な解を求めることが難しくなると考えられる。そのため、より規模の大きな道路網や継続時間の長いシミュレーションを

表 2 各時刻・各セグメントを走行する車両数

Table 2 The number of cars for each time and segment

(a) $T = 3$					
	$R(0, 2)$	$R(1, 2)$	$R(2, 3)$	$R(3, 4)$	$R(3, 5)$
時刻 0	92 (27)	97 (27)	49 (20)	197 (6)	198 (6)
時刻 1	85 (13)	99 (13)	48 (61)	196 (13)	197 (13)
時刻 2	98 (6)	99 (6)	43 (20)	196 (27)	192 (27)
(b) $T = 4$					
	$R(0, 2)$	$R(1, 2)$	$R(2, 3)$	$R(3, 4)$	$R(3, 5)$
時刻 0	88 (27)	86 (27)	42 (20)	198 (6)	193 (6)
時刻 1	91 (27)	99 (27)	43 (61)	194 (13)	192 (13)
時刻 2	95 (13)	94 (13)	45 (61)	198 (27)	199 (27)
時刻 3	95 (6)	97 (6)	47 (20)	192 (27)	199 (27)
(c) $T = 5$					
	$R(0, 2)$	$R(1, 2)$	$R(2, 3)$	$R(3, 4)$	$R(3, 5)$
時刻 0	96 (27)	92 (27)	46 (20)	196 (6)	196 (6)
時刻 1	95 (27)	99 (27)	47 (61)	198 (13)	196 (13)
時刻 2	98 (27)	96 (27)	45 (61)	199 (27)	187 (27)
時刻 3	97 (13)	93 (13)	46 (61)	198 (27)	196 (27)
時刻 4	95 (6)	98 (6)	45 (20)	189 (27)	198 (27)
(c) $T = 6$					
	$R(0, 2)$	$R(1, 2)$	$R(2, 3)$	$R(3, 4)$	$R(3, 5)$
時刻 0	90 (27)	98 (27)	48 (20)	194 (6)	197 (6)
時刻 1	77 (27)	91 (27)	44 (61)	195 (13)	197 (13)
時刻 2	91 (27)	46 (27)	46 (61)	196 (27)	189 (27)
時刻 3	93 (27)	83 (27)	49 (61)	191 (27)	193 (27)
時刻 4	99 (13)	99 (13)	42 (61)	198 (27)	197 (27)
時刻 5	70 (6)	90 (6)	36 (20)	198 (27)	193 (27)

行うためには、需要分布の数が計算量に及ぼす影響が少ないモデルに改良する必要があると考えられる。

7. まとめ

本論文ではロードプライシングにおいて、出発地・到着地・時間帯ごとに道路利用の大きな需要分布が事前に把握できる環境を想定し、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手法を提案した。提案する料金決定手法では需要分布に基づくモデルを設計し、道路が渋滞しない範囲で事業者の総収入を最大化する料金を最適化手法により決定する。本論文では特定の道路環境において、提案手法により利用料金が適切に設定されることを確認した。

今後の課題として、極端に高額な通行料金による道路の寡占を避けるため、通行料金に上限を設けることが考えられる。また、提案する料金決定手法をほかの道路環境や SUMO [23] などの交通シミュレータによって評価することが考えられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 16K16059 の助成による成果である。

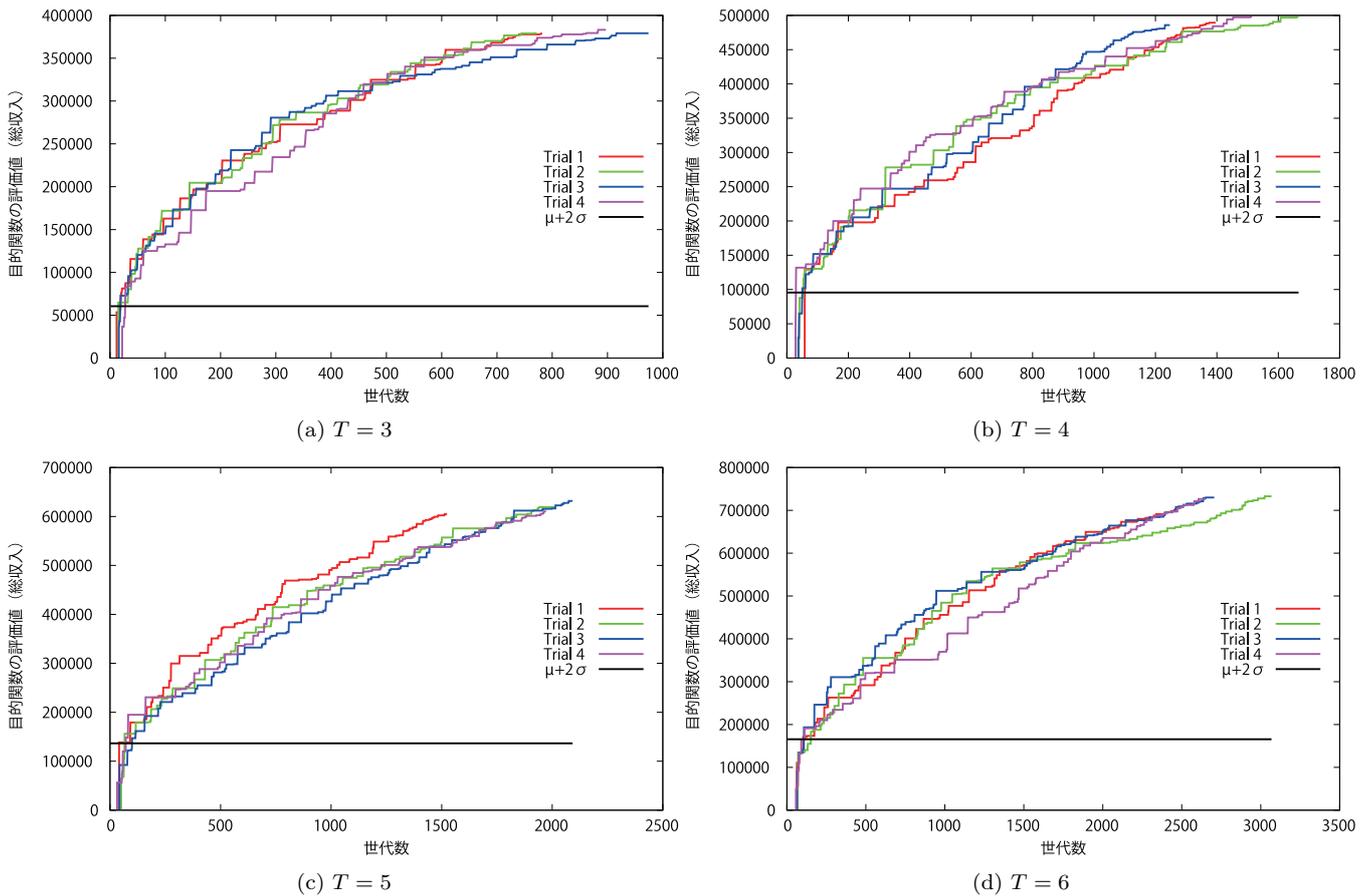


図 4 世代数による目的関数値
Fig. 4 Values of the objective function by the number of generations

参考文献

[1] 一般財団法人自動車検査登録情報協会：自家用乗用車の世帯普及台数. Available at <http://www.airia.or.jp/publish/statistics/mycar.html> (accessed Feb. 1, 2017).

[2] 国土交通省道路局：道路交通センサスからみた道路交通の現状，推移（データ表）. Available at http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/data_shu.html (accessed Feb. 1, 2017).

[3] 武山尚道：道路へのプライシング制度導入の必要性—混雑解消に向けた道路制度の改革と規制緩和を，*Japan Research Review*, Vol. 7, No. 4, pp. 70–101 (1997).

[4] 山田浩之：交通混雑の経済分析：ロード・プライシング研究，No. 15, 勁草書房 (2001).

[5] 森地 茂，清水哲夫：都市高速道路における新たなリアルタイム流入制御手法に関する研究—遺伝的アルゴリズムの適用，*土木計画学研究・論文集*, No. 13, pp. 915–922 (1996).

[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] 高木良太，円山琢也，溝上章志：混雑課金領域の形状制約を考慮した最適設計手法の構築と適用，*土木学会論文集 D3*, Vol. 70, No. 1, pp. 88–101 (2014).

[8] 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*, Vol. 67, No. 5, pp. I.673–I.681 (2011).

[9] Yang, H., Xu, W., He, B.-S. and Meng, Q.: Road Pricing

for Congestion Control with Unknown Demand and Cost Functions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 18, No. 2, pp. 157–175 (2010).

[10] 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).

[11] 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).

[12] 円山琢也：エリア・プライシング政策の評価技術，*都市計画*, No. 264, pp. 42–47.

[13] Maruyama, T. and Sumalee, A.: Efficiency and Equity Comparison of Cordon- and Area-Based Road Pricing Schemes Using a Trip-Chain Equilibrium Model, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 41, No. 7, pp. 655–671 (2007).

[14] 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).

[15] Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E. and Massiani, J.: The Urban Road Pricing Scheme to Curb Pollution in Milan, Italy: Description, Impacts and Preliminary CostBenefit Analysis Assessment, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 44, No. 5, pp. 359–375 (2010).

[16] Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L. and Rosqvist, L. S.: The Stockholm Congestion—Charging Trial 2006: Overview of Effects, *Transportation Research Part A:*

- Policy and Practice*, Vol. 43, No. 3, pp. 240–250 (2009).
- [17] 西尾 崇：米国のHOTレーン，道路，No. 783, pp. 26–29 (2006).
 - [18] Munnich, L. and Buckeye, K.: I-394 MnPASS High-Occupancy Toll Lanes: Planning and Operational Issues and Outcomes, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1996, pp. 49–57 (2007).
 - [19] 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).
 - [20] 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，Vol. 1997, No. 569, pp. 85–94 (1997).
 - [21] 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 (2002).
 - [22] Garey, M. R. and Johnson, D. S.: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, chapter Appendix: A List of NP-Complete Problems, p. 216, W. H. Freeman and Company (1979).
 - [23] Institute of Transportation Systems: SUMO—Simulation of Urban MObility. Available at <http://sumo.dlr.de/> (accessed Feb. 1, 2017).