

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

川上 朋也^{1,a)} 柴田 直樹¹ 伊藤 実¹

概要：我々の研究グループでは現在、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を提案している。提案手法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、経路、時間帯ごとの利用料金を需要分布に基づいて決定する。利用料金は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利用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、交通容量などが動的に変化する。そこで本論文では、需要分布に基づく料金決定手法に環境の動的変化が与える影響を検証する。検証は計算機上のシミュレーションで行い、交通容量が減少した区間に係る利用料金が上がることを確認した。

1. はじめに

交通渋滞は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 [1-7]。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。課金方式と料金変動の例を図 1 に、諸外国における導入事例を表 1 に示す。

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]。我々の提案手法では経路、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、交通容量などが動的に変化する。

そこで本論文では、需要分布に基づくロードプライシングに環境の動的変化が与える影響を検証する。検証は計算機上のシミュレーションで行い、一部の区間で交通容量が減少した場合の影響を調査する。

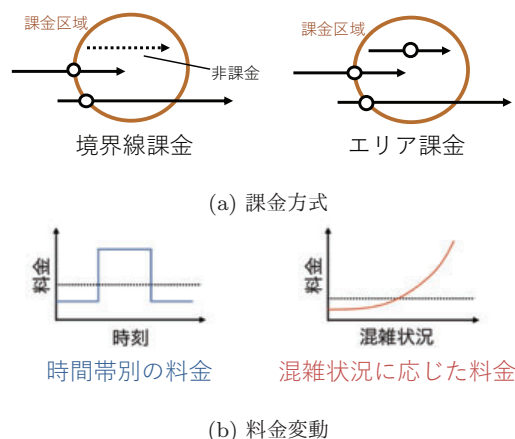


図 1 (a) 課金方式および (b) 料金変動

2. 問題設定

本論文では、我々が提案している需要分布に基づく料金決定手法を前提とする。本章では想定環境と設計モデルについて述べる。

2.1 想定環境

我々の提案手法では、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 [9]。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

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

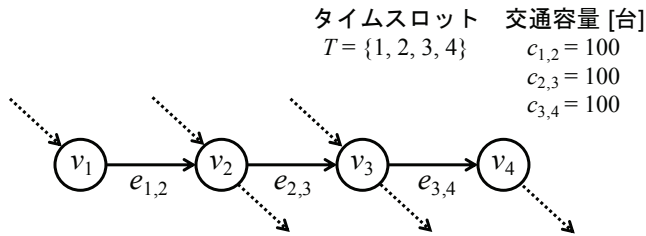


図 2 有料道路の例

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する [10, 11].

2.2 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。

2.2.1 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 $v_i \in V$ 、ゲート v_i, v_j 間の道路区間（セグメント）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。ゲート $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 、タイムスロット $T = \{1, 2, 3, 4\}$ の有料道路の例を図 2 に示す。図 2 は片方向の道路で、破線は各ゲート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 $t_s \in T$ を持つ。

● 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 $N_{i,j,t}$ 、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

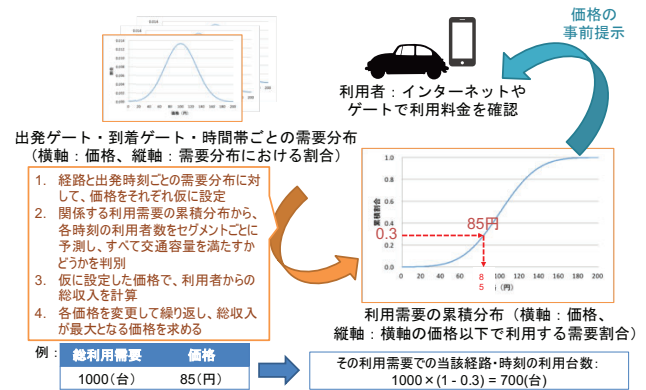


図 3 料金決定の流れ

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、 $|V|$ はゲート数を、 $|T|$ はタイムスロット数を表す。

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。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

本研究では、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。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の式 2 を目的関数とする。

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

3. 需要分布に基づく料金決定手法

2 章で述べたとおり、需要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 $2|V|C_2|T|$ である。

例えば、双方向で各経路の料金 $p_{i,j,t}$ を $150 \leq p_{i,j,t} < 450$ の範囲かつ1単位で決定する場合、各経路の料金の組合せは最大で $(450 - 150)^{2|V|C_2|T|}$ 通りとなる。本研究では、2章の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と図3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

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 [12]。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)、差分進化法 (Differential Evolution, DE) などがある。

4. 動的環境における検証

本論文では3章で述べた手法について、環境の動的変化が与える影響をシミュレーションで検証する。以降、シミュレーション環境と結果について述べる。

4.1 シミュレーション環境

3章で述べた手法では、道路のすべての区間で常に交通容量を越えないことを制約条件としている。しかし、実際の道路では突発的な事故などによって、交通容量などが動的に変化する。そこで、我々の提案手法に環境の動的変化が与える影響を検証するため、一部の区間で交通容量が減少した場合のシミュレーションを行う。

本シミュレーションでは図2で表されるゲート数3、区間数4からなる道路網を用い、タイムスロット $T = 1, 2, 3, 4$ とした。各区間の交通容量は初期状態ではすべて100で、環境が動的に変化したとして、区間 $e_{3,4}$ で突発的な事故が起き、交通容量 $c_{3,4} = 75$ へ一時的に減少した場合と比較した。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。さらに、各経路の需要はすべて100とし、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、

表2 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	598.5	1133.2	1438.4	492.4	1022.7	396.4
2	859.1	1006.1	1492.1	518.8	1097.7	494.1
3	499.7	1000.8	-	476.4	1055.5	626.3
4	403.9	-	-	511.9	-	629.4

表3 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	99.6 (150)	98.5 (100)	85.0 (50)
2	99.9 (150)	99.1 (150)	97.8 (100)
3	100.0 (100)	98.4 (150)	99.7 (150)
4	83.7 (50)	95.1 (100)	99.9 (150)

表4 決定した利用料金による総収入

提案方式	比較手法	車両数が交通容量と同じ場合
649639.8	750000.0	600000.0

$dist$ 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。

$$f_{i,j,t}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{i,j,t}^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{i,j,t})^2}{2\sigma_{i,j,t}^2}\right) \quad (3)$$

3章で述べた組合せ最適化については、本シミュレーションでは差分進化法を用いた。差分進化法の詳細と手順は付録のA.1節に記載する。また、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。提案方式の比較対象としては、各需要分布に対する料金を平均値 μ としたときの道路事業者の総収入と各時刻、各区間を走行する車両数を求めた。

4.2 シミュレーション結果

提案方式で差分進化法を用いた結果を表2に示す。表2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2の料金によって、各時刻、各区間を走行する車両数を表3に示す。表3のかっこ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過していることを表す。表3より、差分進化法を用いて求めた解を利用料金とした場合、交通容量に近い車両数が道路を利用できている。一方、各需要分布の平均値 μ を利用料金とすると、交通容量を超過してしまう場合や、極端に空きが出る場合がある。

次に、各方式での利用料金による総収入を表4に示す。提案方式の利用料金と車両数はそれぞれ表2, 3のとおりで、比較手法は利用料金が各経路の平均値 μ である。また、参考として、すべての時刻、区間で利用料金が μ 、車両数

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

表 5 再計算した利用料金

t	$R(1, 2)$	$R(1, 3)$	$R(1, 4)$	$R(2, 3)$	$R(2, 4)$	$R(3, 4)$
1	579.3 (-3.2%)	1100.7 (-2.9%)	<u>1517.0</u> (+5.5%)	481.4 (-2.2%)	<u>1038.0</u> (+1.5%)	<u>433.4</u> (+9.3%)
2	800.6 (-6.8%)	954.1 (-5.2%)	<u>1574.4</u> (+5.5%)	512.6 (-1.2%)	<u>1142.0</u> (+4.0%)	<u>546.0</u> (+10.5%)
3	504.6 (+1.0%)	990.8 (-1.0%)	-	457.3 (-4.0%)	<u>1086.4</u> (+2.9%)	<u>683.0</u> (+9.1%)
4	381.9 (-5.4%)	-	-	505.1 (-1.3%)	-	<u>719.8</u> (+14.4%)

が交通容量と同じだった場合の総収入も算出した。表 4 より、比較手法は提案方式より総収入は多いが、表 3 のとおり一部の区間で交通容量を超過している。また、提案方式は経路によっては平均値よりも高い利用料金となるため、参考情報の利用料金が μ 、車両数が交通容量と同じ場合よりも、本シミュレーション環境では総収入が多い。

さらに、環境が動的に変化したとして、区間 $e_{3,4}$ で突発的な事故が起き、交通容量 $c_{3,4} = 75$ へ一時的に減少した場合において、再計算した料金を表 5 に示す。表 5 で下線の値はその時刻、経路に $e_{3,4}$ が含まれることを表し、かつこの値は交通容量 $c_{3,4}$ が減少前の表 2 からの増減を百分率で表す。

表 5 より、交通容量が減少した $e_{3,4}$ を含む下線の値の経路は表 2 からすべて料金が上がっている。一方、料金が上がった経路には交通容量が減少していない区間も含まれており、車両が減少した分を埋めるため、下線以外の経路のほとんどは料金が下がっている。以上のとおり、適切な利用料金は道路状況とともに変わり、交通を柔軟に制御するためには利用料金を動的に更新する必要がある。

5. まとめ

我々の研究グループでは、ロードプライシング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。本論文では提案手法に環境の動的変化が与える影響として、一部の区間で交通容量が減少した場合の影響を検証した。検証は計算機上のシミュレーションで行い、交通容量が減少した区間に関係する利用料金が上がることを確認した。

今後の予定として、事故などの状況の変化を反映して利用料金を再計算し、更新後の利用料金を利用者へ通知することで、交通を動的に制御可能な料金更新手法を検討する。
謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K00146 の助成による成果である。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).

- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [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, pp. 934–940 (2017).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).

付 録

A.1 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 [13, 14]. 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．

$$\mathbf{v}_i^{(G)} = \mathbf{x}_{r_1}^{(G)} + F \cdot (\mathbf{x}_{\text{best}}^{(G)} - \mathbf{x}_{r_1}^{(G)}) + F' \cdot (\mathbf{x}_{r_2}^{(G)} - \mathbf{x}_{r_3}^{(G)}) \quad (\text{A.1})$$

(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,

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

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{pop}}$$

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と上限である．

突然変異: 集団内の個体 $\mathbf{x}_i^{(G)}$ から式 (A.1) 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

$$\mathbf{u}_i^{(G)} = \{\mathbf{u}_{i,1}^{(G)}, \mathbf{u}_{i,2}^{(G)}, \dots, \mathbf{u}_{i,D}^{(G)}\}, \quad (\text{A.3})$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{pop}}$$

を生成する．ここで

$$u_{i,j}^{(G)} = \begin{cases} v_{i,j}^{(G)} & \text{if } \text{rand}(0, 1) \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j}^{(G)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

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,

$$\mathbf{x}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{(G)} & \text{if } f(\mathbf{x}_i^{(G)}) < f(\mathbf{u}_i^{(G)}) \\ \mathbf{x}_i^{(G)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

とする．