

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656301

研究課題名(和文) 持続可能な交通システムのための新制度提案：進化的環境料金と走行排出権取引

研究課題名(英文) Two Novel Approaches for Sustainable and Efficient Transportation Networks: Emission Pricing / Emission Permits

研究代表者

長江 剛志 (Nagae, Takeshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30379482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、持続可能な道路交通システムを実現するための2つの新しい制度として、1) 進化的環境料金制度と 2) 走行排出権取引制度という2つの新しい制度を提案し、その優位性を比較した。具体的には、まず、複数車種が混在する一般的な枠組の下で、持続可能なシステム最適(SSO: sustainable system optimal)配分を定式化した。そして、古典的な混雑料金を拡張した静的環境料金制度および提案した2つの制度の下で、SSO配分が自律分散的に実現するための条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to propose three new schemes: static emission pricing (SEP), evolutionary emission pricing (EEP), and tradable emission permits (TEP), and analyze the conditions of the three schemes necessary to achieve the sustainable system-optimal (SSO) traffic assignment in a decentralized manner. In the SEP scheme, the road manager should estimate the traffic demand, which is difficult to observe, to reach an optimal solution to the SSO problem. In the EEP scheme, the road manager can find the appropriate Lagrange multiplier of the SSO problem through some trial-and-error adjustments to achieve the SSO assignment. In the TEP scheme, the road manager just sets the TEP market and keeps it competitive without doing anything. These processes imply that the SEP scheme is difficult to implement, the EEP scheme and the TEP scheme are the possible approaches to achieve the SSO assignment on the current status of our study.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木計画学・交通工学

キーワード：交通計画 持続可能性 環境料金 排出権取引

## 1. 研究開始当初の背景

持続可能な交通システムの実現は、近年の国内外の交通政策における共通の重点課題の1つである。本研究では、交通システムが環境面、社会面、経済面のいずれの側面からも持続可能であるための必要条件を「環境への負荷が許容できる程度に小さく、利用者の選択の自由が保証され、かつ、交通ネットワーク全体の性能 (eg. 総旅行時間を可能な限り高められること)」と表現することにした。

Nagurney (2000) は、道路上を走行する車両の環境負荷の総量が許容範囲内となる中で総旅行時間を最小にする交通配分を「持続可能なシステム最適」(SSO: *sustainable system optimal*) 配分として定義していた。そして、SSO 配分を実現する方法として、各リンクの利用者に料金を賦課する環境料金制度を提案し、その料金を具体的に計算するアルゴリズムを開発した。しかし、このモデルでは、環境負荷に関する非現実的な仮定を採用しており、均衡状態に至る動学を明示的に考慮できる理論的枠組も備えていなかった。さらに、具体的な料金の計算には、極めて観測が困難な情報を入力として与える必要があるため、そのまま実用化するには問題が残されていた。本研究では、環境負荷や集団動学に関する不自然な仮定を必要とせず、観測可能な情報のみを用いて運用できる制度の提案を着想した。

## 2. 研究の目的

本研究では、まず、Nagurney (2000) の SSO 配分モデルを、(特に、環境負荷と交通量の関係に関して) より現実的な枠組へと一般化する。次に、下記の2つの制度を提案する:

- (i) 進化的な環境料金制度: 各リンクの利用者に、環境負荷に応じた料金(「環境料金」)を賦課する。この料金は、観測されるリンク交通量に応じて日々更新される。
- (ii) 走行排出権取引制度: 各リンクの利用者に、当該リンクの走行に不可欠な温室効果ガスの「排出権」を事前に購入することを義務づける。排出権は電子市場取引を通じて配分され、その需給がバランスするような完全競争価格は市場メカニズムによって決定される。

最後に、それぞれの制度の下で、SSO 配分が自律分散的に実現する、すなわち、各利用者が局所的な情報に基づいて利己的に経路を選択した結果、SSO 配分が実現するための条件を明らかにする。

## 3. 研究の方法

第1に、持続可能なシステム最適配分(SSO配分)モデルを定式化し、その基本的特性を明らかにする。第2に、進化的な環境料金制度の具体的な手続きを構築し、その大域的収束が保証されるための条件を明らかにする。特に、車種間で外部性が非対称な場合や、排出量が交通量の単純増加関数でないについても提案制度が有効に機能することを明らかにする。第3に、走行排出権取引制度に対して、完全競争的な市場の実現に不可欠なメカニズムの設計とその具体的な手続きを構築し、提案制度の大域的収束性が保証されるための条件を明らかにする。最後に、2つの提案制度の長所と短所を整理し、持続可能な交通システムの実現に向けた政策提言を行う。

## 4. 研究成果

## (1) モデルの枠組

1つの起終点ペアを複数の並行リンクが結ぶネットワークを考える。リンク集合を  $\mathcal{A}$  で表す。このネットワークを利用する複数タイプの利用者を考える。タイプ集合を  $\mathcal{J}$  で表す。タイプ  $j \in \mathcal{J}$  の利用者数を所与の定数  $D^j$  で表す。リンク  $a \in \mathcal{A}$  上のタイプ  $j \in \mathcal{J}$  の利用者数を  $x_a^j$  で表し、リンク  $a$  上の交通量パターンを  $\mathbf{x}_a := \{x_a^j : j \in \mathcal{J}\}$  で表す。リンク  $a$  上の交通量パターンが  $\mathbf{x}_a$  であるとき、このリンク上のタイプ  $j \in \mathcal{J}$  利用者からの排出量を  $v_a^j(\mathbf{x}_a)$  で表す。ネットワーク全体で許容される総排出量(環境容量)が所与の定数  $Q$  で与えられるとする。以下では、簡単のため、リンク  $a$  のタイプ  $j$  の交通費用は所与の定数  $c_a^j$  で表されるとする。

(2) 持続可能なシステム最適 (SSO: *Sustainable System Optimal*) 配分

ここでは、Nagurney (2000) のモデルを上述の枠組に一般化する。以下では、持続可能なシステム最適(SSO)配分を、総排出量が  $Q$  を超えない範囲で総交通費用を最小化する配分として定義す

る。これは、上述の枠組の下で以下のように定式化される。

$$[\text{SSO}] \quad \min_{\mathbf{x}} F(\mathbf{f}) = \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_a^j c_a^j \quad [1]$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_a^j v_a^j(\mathbf{x}_a) \leq Q \quad [2]$$

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} x_a^j = D^j, \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [3]$$

$$x_a^j \geq 0, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J} \quad [4]$$

問題 [SSO] の目的関数 [1] は SSO 配分が効率的であることを表している。第 1 の制約 [2] は総排出量が環境容量を超えないことを保証している。第 2 の制約 [3] および最後の制約 [4] は、それぞれ、フロー保存則と非負制約を表している。

### (3) 静的環境料金制度

静的環境料金制度では、管理者は、各リンクの利用者から、そのタイプごとに異なる環境料金を賦課する。リンク  $a \in \mathcal{A}$  上のタイプ  $j \in \mathcal{J}$  に対する環境料金を  $e_a^j$  で表す。環境料金  $\mathbf{e} := \{e_a^j : j \in \mathcal{J}, a \in \mathcal{A}\}$  の下での利用者均衡状態が SSO 配分を実現するとき、この料金は最適であると呼ぶ。

最適環境料金が満足すべき条件は、SSO 配分と伝統的な SO 配分に共通な数学的構造を活用して求められる。まず、問題 [SSO] の排出量制約を Lagrange 緩和した問題：

$$[\text{SSO}] \quad \min_{\mathbf{x}} \hat{F}(\mathbf{f}) = \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_a^j c_a^j + p \left( \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_a^j v_a^j(\mathbf{x}_a) - Q \right) \quad [5]$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} x_a^j = D^j, \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [6]$$

$$x_a^j \geq 0, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J} \quad [7]$$

を考える。ここで、 $p$  は所与の定数である。明らかに、問題 [SSO] の最適 Lagrange 乗数  $p^*$  と等価となるように  $p$  を選んだ時、問題 [SSO'] に対する最適配分は [SSO] に対する最適配分に一致する。

問題 [SSO'] の目的関数は

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_a^j (c_a^j + p v_a^j(\mathbf{x}_a)) - pQ \quad [8]$$

と書き直せる。ここで、第 2 項は定数である。いま、 $u_a^j(\mathbf{x}) = c_a^j + p v_a^j(\mathbf{x})$  を配分  $\mathbf{x}$  の下でのリンク  $a$  を走行するタイプ  $j$  の「リンク費用関数」

とすれば、式 [8] の第 1 項は、このリンク費用関数の下での総走行費用（あるいは社会的費用）、すなわち、伝統的な SO 配分問題の目的関数と見なせる。このことは、環境料金を、リンク費用関数  $u_a^j$  の下での限界社会的費用に一致するように選べば、目的関数を最小化できることを示唆している。換言すれば、環境料金を

$$e_a^j = p^* \left\{ v_a^j(\mathbf{x}_a^*) + \sum_{k \in \mathcal{J}} x_a^{k*} \frac{\partial v_a^k(\mathbf{x}_a^*)}{\partial x_a^j} \right\} \quad [9]$$

と選べば、SSO 配分が実現できる。しかし、式 [9] を評価するためには、右辺に登場する SSO 配分問題の解  $\mathbf{x}^*$  および  $p^*$  を求める必要があることに注意されたい。このことは、最適な環境料金を求めるには SSO 配分を解かねばならず、そのためには、タイプごとの交通需要  $D^j$  をモデル入力して推計する必要があることを意味している。このことは、(タイプ別の) 交通需要の推計に誤差がある場合、環境料金は必ずしも最適とならない(それどころか、かえって持続可能性を損う)可能性があることを示唆している。

### (4) 進化的環境料金制度

進化的環境料金制度では、各リンク上で観測される交通パターンに応じて料金を変化させる。交通量パターンが  $\mathbf{x}$  であるときの、リンク  $a$  上のタイプ  $j$  利用者に対する料金を  $e_a^j(\mathbf{x})$  で表す。以下では、適当な進化的料金制度の下では、自然な仮定を満足する交通量の day-to-day ダイナミクスの大域的停留点として SSO 配分が実現することを示そう。

交通配分パターンの動学を  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}(\mathbf{x})$  と記述する。ここで、 $\mathbf{M}(\mathbf{x}) := \{M_a^j(\mathbf{x})\}$  であり、 $M_a^j(\mathbf{x})$  は、交通配分が  $\mathbf{x}$  である時の、タイプ  $j$  のリンク  $a$  の交通量の増分である。

$\mathbf{M}$  は、以下の条件を満足するとき、費用関数  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) := \{u_a^j(\mathbf{x})\}$  について admissible であるという。

(i)  $\mathbf{M}$  は Lipschitz 連続

(ii)  $x_a^j = 0$  ならば  $M_a^j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J}$

(iii) 任意の交通パターン  $\mathbf{x}$  について、 $\sum_{a \in \mathcal{A}} M_a^j(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall j \in \mathcal{J}$

(iv)  $\mathbf{M}(\mathbf{x}) \neq \mathbf{0}$  ならば、 $\sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} M_a^j(\mathbf{x}) u_a^j(\mathbf{x}) < 0$

進化的環境料金  $e(\mathbf{x}) := \{e_a^j(\mathbf{x}) : a \in \mathcal{A}, j \in \text{C/IJ}\}$  の下での一般化費用関数  $u_a^j(\mathbf{x}) = c_a^j + e_a^j(\mathbf{x})$  について admissible な任意の動学  $\mathbf{M}$  の全ての解軌跡が SSO 配分に収束するとき、 $e(\mathbf{x})$  は最適であると呼ぶことにする。ここで、前節で示した Lagrange 緩和問題 [SSO] が  $c_a^j + p v_a^j(\mathbf{x})$  を費用関数と見なした時の伝統的な SO に帰着することを思い出されたい。このことは、最適な進化的環境料金が

$$e_a^j(\mathbf{x}) = p^* v_a^j(\mathbf{x}_a) \quad [10]$$

となることを意味している。詳細な証明については、Sandholm(2002) を参照せよ。

静的環境料金に対する進化的環境料金の優位性は明白である：進化的料金制度の下では、前もって SSO 配分を解く必要がない。[10] は問題 [SSO] の最適 Lagrange 乗数  $p^*$  を含んではいないが、このことは、直ちに [SSO] をあらかじめ前もって解く必要があることを意味しない。Lagrange 乗数  $p$  は超過排出に対するペナルティと解釈できることから、以下のような試行錯誤によって最適な  $p^*$  が求められると考えられる：(i) 初期 Lagrange 乗数として適当な正の値  $p^{(1)} > 0$  を選び、 $n = 1$  とする；(ii)  $p^{(n)}$  の下での進化的環境料金制度を、交通量パターンが均衡状態  $\mathbf{x}^{(n)}$  に収束するまで実施する；(iii)  $\mathbf{x}^{(n)}$  の下での総排出量が環境容量  $Q$  を超えていれば  $p^{(n+1)} > p^{(n)}$ 、総排出量が環境容量を下回っていれば  $p^{(n+1)} < p^{(n)}$  となるように次の Lagrange 乗数を選ぶ。

#### (5) 走行排出権取引制度

走行排出権取引制度では、各リンクの利用者は、各日のトリップ前に予め (電子) 市場から必要な排出権を購入することを求められる。各日で必要な排出権の量はリンクおよび利用者タイプによって異なり、前日の交通量パターンに応じて決定される。各日において、排出権 1 単位あたりの価格は、排出権取引市場における需給がバランスするように調整される。このことは、走行排出権取引制度においては、道路管理者の役割は、排出権取引市場の設立と、これが競争的かつ効率的であるように維持することのみであることを示唆する。

走行排出権取引制度もまた、その収束点として SSO 配分を実現する。まず、凸計画問題 SSO に対する一般的な部分線形化アルゴリズムを概観しよう：

Step 1 適当な初期許容解  $\mathbf{x}^{(1)}$  を求め、 $n = 1$  とする。

Step 2 問題 SSO の目的関数を  $\mathbf{x}^{(n)}$  の周りで一次近似したサブ問題を解いて補助解  $\mathbf{y}^{(n)}$  を求める。

Step 3  $(1 - \alpha^{(n)}) \mathbf{x}^{(n)} + \alpha^{(n)} \mathbf{y}^{(n)}$  における [SSO] の目的関数値が最小となるような最適ステップ・サイズ  $\alpha^{(n)} \in [0, 1]$  を求める。

Step 4  $\alpha^{(n)}$  が十分に小さければ停止する ( $\mathbf{x}^{(n)}$  は SSO 配分); そうでなければ、 $\mathbf{x}^{(n+1)} := (1 - \alpha^{(n)}) \mathbf{x}^{(n)} + \alpha^{(n)} \mathbf{y}^{(n)}$ ,  $n := n + 1$  とし、Step 2 に戻る。

ここで、Step 2 で解くべきサブ問題として、以下の部分線形化された問題を用いる：

$$[\text{SSO-sub}] \quad \min_{\mathbf{y}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_a^j c_a^j \quad [11]$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_a^j \bar{v}_a^j(\mathbf{x}_a^{(n)}) \leq Q \quad [12]$$

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} y_a^j = D^j, \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [13]$$

$$y_a^j \geq 0, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J} \quad [14]$$

ここで、サブ問題を解いて [SSO-sub] 補助解  $\mathbf{y}$  を求めることは、利用者タイプ別の交通需要  $D^j$  を入力として与える必要があることから、困難であることに再び注意されたい。本研究で提案する排出権取引制度では、この補助解を別の方法で求めることに相当する：排出権取引市場の均衡状態として観測するのである。

通行排出権取引制度の下での交通システムおよびその均衡状態は以下のように特徴づけられる。 $n - 1$  日目の交通状態  $\mathbf{x}^{(n-1)}$  を与件としたとき、タイプ  $j$  の利用者がリンク  $a$  を利用するためには、 $\bar{v}_a^j(\mathbf{x}_a^{(n-1)}) := v_a^j(\mathbf{x}_a^{(n-1)})$  だけ購入しなければならない。 $p^{(n)}$  を通行排出権カタログ  $\mathbf{v}^{(n)} := \{\bar{v}_a^j(\mathbf{x}_a^{(n-1)}) : a \in \mathcal{A}, j \in \mathcal{J}\}$  の下での排出権 1 単位あたりの価格とする。このとき、タイプ  $j$  の利用者にとってのリンク  $a$  の交通費用は  $c_a^j + p \bar{v}_a^j$  となる。 $\mathbf{y}^{(n)} := \{y_a^j(\mathbf{x}_a^{(n-1)}) : a \in \mathcal{A}, j \in \mathcal{J}\}$  をある実行可能なフローパターンとしよう。2つ組  $(\mathbf{y}^{(n)}, p^{(n)})$  は、以下の2つを満足するとき、通行排出権取引市場における均衡状態であるという：(i) 全ての利用者がそれ以上自分の経路選択を変えるインセンティブを持たない；(ii) 通行排出権市場の需給がバランスしている (市場が清算されている)。これ

は、以下のように定式化できる。

[UE-TEP]

(1) 利用者の最適行動条件:

$$\begin{cases} y_a^j > 0 & \Rightarrow \pi^j = c_a^j + p\bar{v}_a^j \\ y_a^j = 0 & \Leftarrow \pi^j > c_a^j + p\bar{v}_a^j \end{cases} \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J} \quad [15]$$

(2) 市場清算条件:

$$\begin{cases} p > 0 & \Rightarrow \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_a^j \bar{v}_a^j = Q \\ p = 0 & \Leftarrow \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_a^j \bar{v}_a^j < Q \end{cases} \quad [16]$$

(3) フロー保存則:

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} y_a^j = D^j \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [17]$$

(4) フローの非負条件:

$$y_a^j \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{J} \quad [18]$$

簡単な計算により、通行排出権取引市場の均衡条件 [TEP-UE] とサブ問題 [SSO-Sub] の最適性条件が等価であることを示せる。これは、道路管理者がサブ問題 [SSO-Sub] 解く必要がなく、利己的な利用者集団の市場均衡状態として自律分散的に実現することを示唆している。従って、以下の手続きによって、[SSO] の解が  $\{(\mathbf{x}^{(x)}, p^{(n)})\}$  の収束点として実現する。

- Step 1 適当な初期交通パターン  $\mathbf{x}^{(0)}$  を与件とし、 $n = 1$  とする。
- Step 2 前日の交通パターン  $\mathbf{x}^{(n-1)}$  の下で、通行排出権カタログ  $\bar{\mathbf{v}}^{(n)} := \{\bar{v}_a^j : a \in \mathcal{A}, j \in \mathcal{J}\}$  を求める。
- Step 3 カタログ  $\bar{\mathbf{v}}^{(n)}$  の下で通行排出権市場を運用し、均衡状態  $(\mathbf{x}^{(n)}, p^{(n)})$  を実現させる。
- Step 4 総排出量  $\sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{j \in \mathcal{J}} v_a^j(\mathbf{x}^{(n)}) x_a^j(\mathbf{x}^{(n)})$  が  $Q$  を上回っていないならば停止する (SSO 配分が実現された); そうでなければ、 $n := n + 1$  として Step 2 に戻る。

上述の手続きにおいて、道路管理者はフローパターンや最適排出権価格を計算する必要が無いことに注意されたい。価格とフローパターンは、市場均衡状態として、自律分散的に実現し、管理者はそれを観測するのみでよいのである。

(6) まとめ

本研究では、まず、持続可能なシステム最適 (SSO) 配分を定義し、これを実現するための政策として、静的環境料金制度、進化的環境料金制度および通行排出権取引制度を提案し、それぞれの制度の長所と短所を明らかにした。このうち、まず、静的環境料金制度においては、最適な環境料金の決定には SSO 配分問題の最適解が必要であり、それを求めるためにはモデルの入力として直接観測が困難な利用者タイプ別の正確な交通需要が必要である。次に、進化的環境料金制度では、日々観測される交通状態に応じて料金を変更することで、こうした交通需要を必要とせずに SSO 配分が実現することを明らかにした。なお、最適な進化的環境料金の決定には、やはり SSO 配分問題の最適な Lagrange 乗数を計算する必要があるが、これは試行錯誤的に推計できることが示された。最後に、通行排出権取引制度では、管理者は前日に観測された交通パターンに応じて必要排出権のカタログを更新し、排出権取引市場を競争的かつ効率的に維持するのみで、SSO 配分を実現できることが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- (i) Nagae, Takeshi: Tradable Time-Specific Permits with Multiple Purchase Opportunity under Dynamic Uncertainty, *The First International Workshop on Market Design Technologies for Sustainable Development*, 2013 年 11 月 26 日 (招待講演), Keio University
- (ii) Lu, Xiaoyun and Nagae, Takeshi: Trading Mechanisms and Learning Rules for Time-specific Permits with Multiple Purchase Opportunities under Dynamic Uncertainty, *Joint Agent Workshop and Symposium (JAWS) 2012*, 2012 年 10 月 26 日, Yamaha Resort Tsumagoi
- (iii) Yue, Yuling and Nagae, Takeshi: Online Mechanism for Tradable Priority-Pass in A Theme-Park, *Joint Agent Workshop and*

*Symposium (JAWS) 2012*, 2012 年 10 月  
26 日, Yamaha Resort Tsumagoi

- (iv) Nagae, Takeshi: Evolutionary Congestion Pricing with Non-monotone Cost Functions, *Seoul National University-Tohoku University Joint Seminar on Sustainable Transportation*, 2012 年 8 月 10 日, Seoul, Korea
- (v) 長江 剛志: 費用関数が非単調な場合の進化的混雑料金制度, 土木計画学研究・講演集 45, CD-ROM, 2012 年 6 月 2 日, 京都大学

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特に無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長江 剛志 (NAGAE, Takeshi)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 3 0 3 7 9 4 8 2

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し