

# 計算幾何学的手法を用いた混雑課金領域の最適設計アルゴリズムの構築と適用

○ 熊本大学 学生員 高木良太  
熊本大学 正会員 円山琢也  
熊本大学 正会員 溝上章志

## 1. はじめに

ロード・プライシング政策（以下、混雑課金政策）は、その課金領域や課金レベルを適切に設定することで最大の効果を発揮できるが、その影響は複雑であり、最適な設定を見つけることは困難な作業である。

Sumalee<sup>1)</sup>は、コードン課金の課金領域と課金額を決定する二段階最適モデルの定式化と解法（branch-tree 手法）を示している。高木ら<sup>2)</sup>は、この解法を拡張してエリア課金の最適設計アルゴリズムを構築した。

branch-tree 手法は、課金領域の中心の最適化を行うことができないため、計算前に人の判断によって課金領域の中心ノードを指定する必要がある。また、計算中の領域の形状制御が困難なため、最適解が非現実的な領域となることがある。

本研究は、コードンおよびエリア課金の最適設計において、課金領域の形状制御と中心位置の最適化が可能な新たな計算法を構築し、その有用性を確認することを目的とする。

## 2. 二段階最適化モデル

課金領域と課金レベルの最適化は二段階の最適化問題として定式化される。本研究では、下位問題の利用者均衡条件の制約のもと、社会的余剰を最大化する課金領域・課金レベルを設定する問題を考える。解法には遺伝的アルゴリズム（以下、GA）をベースにした方法を用いるため、変数である課金領域を、3章で示す手法を用いて GA で使用できる形式で表現する。なお、モデルの詳細については参考文献<sup>2),3)</sup>を参照されたい。

## 3. 計算幾何学的手法を用いた課金領域の表現方法

### 3.1 概略

本研究では、課金領域の中心座標とそれを基点としたベクトルの集合から計算される領域境界線によって、エリア課金やコードン課金の課金領域を表現する手法（以下、提案手法）を提案する。課金領域を座標指定によって定義することで、計算中の中心位置の自由な移動と形状制御を容易に行うことが可能になる。この点が、分析対象ネットワークの構造に依存した木構造により課金領域を表す既存の branch-tree 手法<sup>1)</sup>との違いである。なお、均衡配分時にリンク単位の課金状態を判定する必要があるため、計算幾何学的手法によって課金領域と課金リンクの対応付けを行う。

### 3.2 極座標形式による領域の表現

課金領域を、中心座標とそれを原点とする平面極座標系における極座標成分の集合の2つの属性によって定義する（図1a）。これらの属性データからネットワークの直交座標系に対応するベクトルを算出し（図1b）、課金領域の境界を表すベ

クトルの集合（以下、境界ベクトル）を得る（図1c）。以上のように境界ベクトルを間接的に保持する理由は、GA との適合性を高めるためである。

課金領域と課金リンクの対応付け（図1d）は、境界ベクトルとネットワークのリンクの交差判定と内外判定を計算幾何学的手法にて行う。

## 4. 解法

本研究における二段階最適化モデルは多峰性の非線形問題となる。そこで、解法にはGAをベースとしたメタヒューリスティックな手法を用いる。最適化のフローを図2に示す。

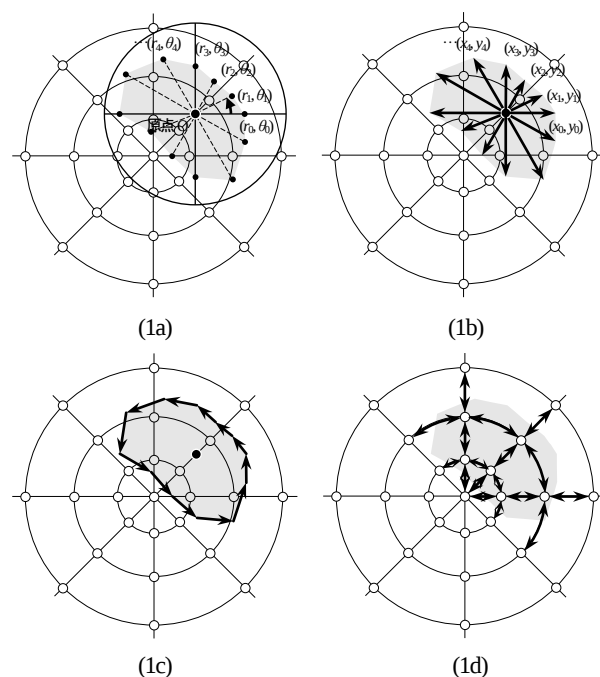


図1 提案法による課金領域の表現

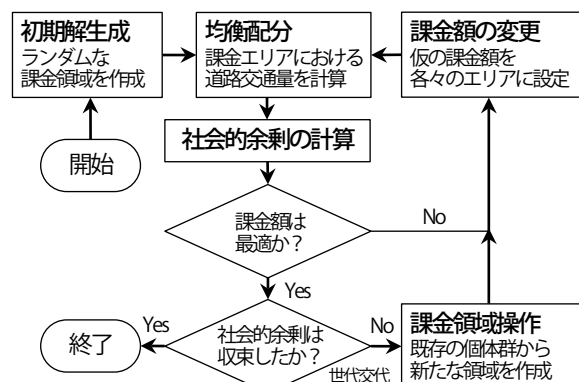


図2 最適化のフロー図

課金領域を表す属性は、その中心座標と極座標成分(動径)の配列である。いずれも固定長の配列データであるため、そのまま遺伝子配列として扱うことができる(図3)。

中心座標の遺伝子配列 

|     |     |
|-----|-----|
| $x$ | $y$ |
|-----|-----|

形状を表す遺伝子配列 

|       |       |       |          |           |
|-------|-------|-------|----------|-----------|
| $r_0$ | $r_1$ | $r_2$ | $\cdots$ | $r_{ A }$ |
|-------|-------|-------|----------|-----------|

図3 課金領域を表す遺伝子配列の例

遺伝子で表現された課金領域に対し、GAの基本プロセスである選択(淘汰)、交叉、突然変異に基づく操作を加える。なお、本研究では、探索効率化のために通常のGAプロセスに加えて、局所探索用個体群の設定や領域の拡張・縮小、移動といった独自のプロセスを追加している。

## 5. 実都市ネットワークへの適用

宇都宮都市圏に対して本モデルの適用を行った。平成4年度宇都宮都市圏PT(パーソン・トリップ)調査のデータを利用し、既存研究<sup>2),3)</sup>と入力条件を同一にして、比較分析ができるように設定している。課金方式はエリア課金とし、課金レベルは250円固定で行った。なお、社会的余剰の上昇率は、Maruyama and Sumalee<sup>3)</sup>において、人の手によって設定されたエリア課金領域による余剰の最適値を基準に算出する。

### 5.1 形状制限を設けない最適化

図4は形状制限を設けずに最適化モデルの実行によって得られた結果の一つである。形状制限を設けないと非凸型の非現実的な出力となっていることが確認できる。社会的余剰の上昇率は約47%であった。同条件でbranch-tree手法を用いた最適化では約50%であったため、それと比較すると上昇率は低い。これは、branch-tree手法がリンク1本単位で細かく課金領域を探索できるのに対し、提案手法はそれが行えないためである。ただし、上昇率の差は小さく、提案手法は実用上十分な探索能力を有しているといえる。

### 5.2 形状制限を設けた最適化

図5は領域に凸形状の制限を設けて最適化を行った結果である。社会的余剰の上昇率は25%であった。制限を設けない条件下の解と比較して形状の起伏が抑えられた一方で、上昇率は減少した。

### 5.3 複数課金領域の最適化

GAを用いた解法に、課金領域の重なり回避を行うプロセスを追加することで、複数課金領域における最適化を可能にした。図6は二つの領域でエリア課金の最適化を行った結果である。中央部分の主要な課金領域に加え、その外側の一部の混雑が激しい部分に対して第二の課金領域が設定された。社会的余剰の上昇率は約85%であり、単一課金領域の最適解より高い上昇率を示した。

## 6. まとめ

形状制御が可能で、課金領域の中心位置の最適化も考慮したコードン・エリア課金の最適領域の計算手法を開発し、実都市への適用によってその有用性を示した。

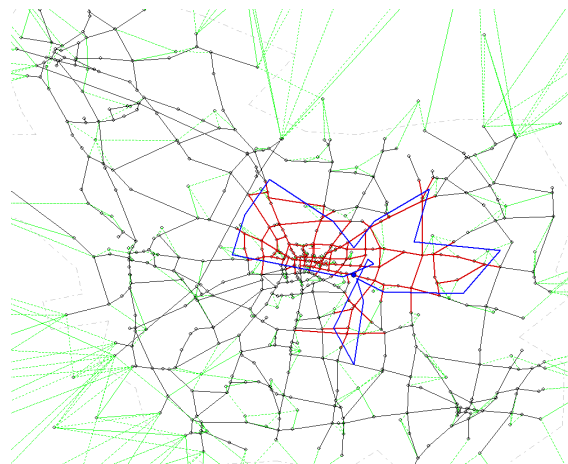


図4 形状制限を設けないエリア課金の最適領域

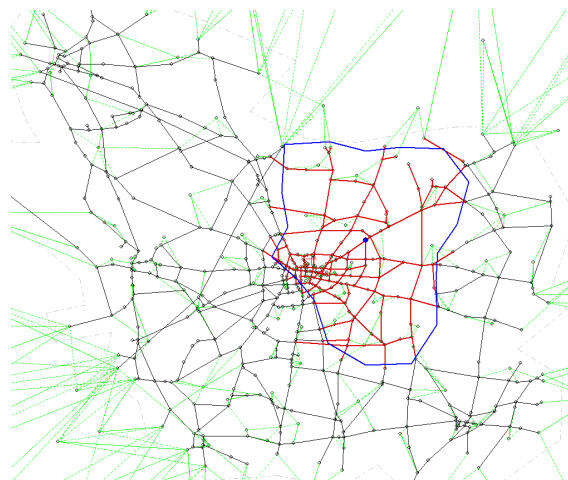


図5 形状制限を設けたエリア課金の最適領域

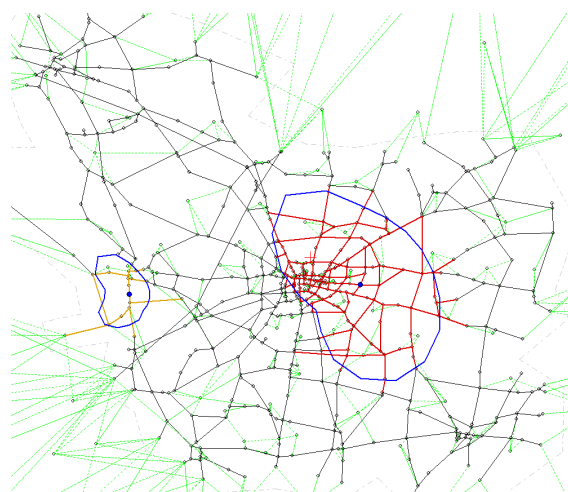


図6 複数課金領域のエリア課金の最適領域

## 参考文献

- 1) Sumalee, A.: Optimal road user charging cordon design: a heuristic optimization approach, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, pp. 377-392, 2004.
- 2) 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(土木計画学), Vol.67, No.5(土木計画学研究・論文集第28巻), 1233-1242, 2011.
- 3) 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*, Vol. 41, Issue 7, pp. 655-671, 2007.