

行動モデル夏の学校2014

9/27

講義2 ネットワーク理論と行動モデル

混雑課金評価モデルに見る ネットワーク上における行動記述

熊本大学 円山琢也

Jonas Eliasson:

How to solve traffic jams

TEDxHelvetia · 8:27 · Filmed Sep 2012
 Subtitles available in 32 languages

View interactive transcript



Who's in charge of London's bread supply?



パン供給の担当が知っているかい？」

TED^xHelvetia
x = independently organized TED event

Traffic volume (incoming veh/hr)	Travel time (minutes)
0	~8
500	~8
1000	~8
1500	~8
2000	~15
2500	~55

渋滞は急速に悪化し始めるということです



パン供給の運営は自動的に行われてるんだ」



JONAS こんには SSON
今日は渋滞についてお話しす

混雑課金政策の評価モデル

- どのような利用者の行動変化を期待しているのか
 - 経路変更、手段変更、出発時刻変更、目的地変更、トリップ・チェーン・パターン変更、長期的な立地変更 等
- それに対応した精度のモデル構築が重要
- c.f.行動モデル/ネットワークモデルの構築のみならず、政策の制度設計も重要

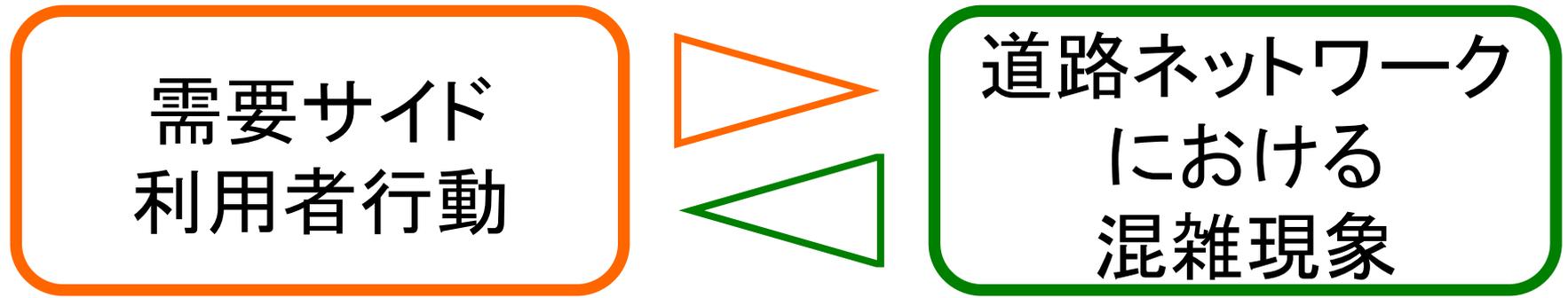
古典的な交通ネットワークモデル

- 静的利用者均衡配分
- OD交通量固定-経路選択行動(最短経路選択)
- OD需要変動 - 確率的経路選択

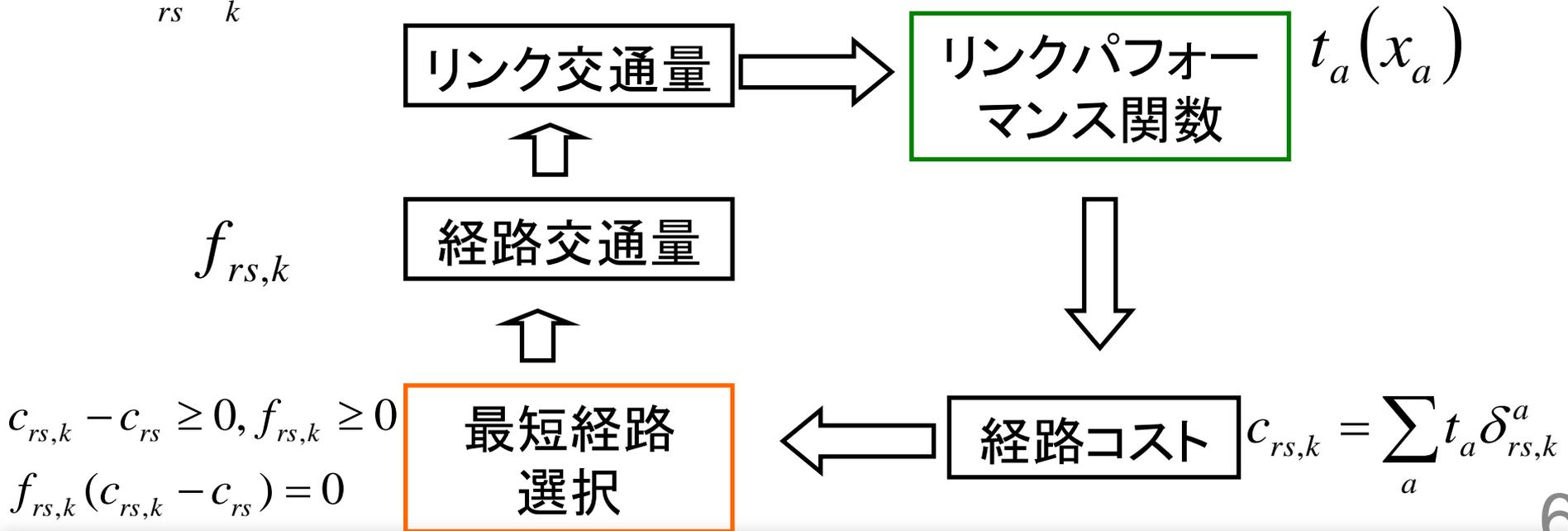
需要変動の表現法も多様

- OD単位の需要関数 Beckmann et al モデル
- 手段選択・目的地選択モデルとの統合 (NLモデル)
- トリップ・チェーン単位の需要関数

固定需要型**確定**的利用者均衡

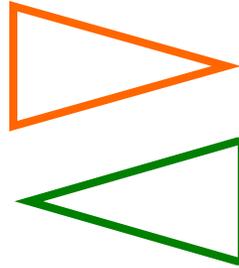


$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_{rs,k} \delta_{rs,k}^a$$



(需要固定型)確率的利用者均衡モデル (Logit SUE)

需要サイド
利用者行動



道路ネットワーク
における
混雑現象

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}$$

リンク交通量 \rightarrow リンクコスト関数 $t_a(x_a)$

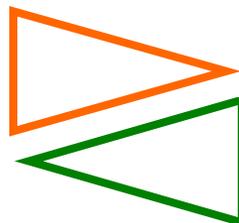
f_k^{rs} \uparrow 経路交通量



経路コスト $c_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs}$ \leftarrow ロジット型経路選択

$$f_k^{rs} = q_{rs} \frac{\exp(-\theta c_k^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta c_k^{rs})}$$

需要サイド
利用者行動



多手段ネットワーク
混雑現象

手段別経路交通量

$$f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs} \Pr(k | m, rs)$$



手段別経路選択確率

$$\Pr(k | m, rs) = \frac{\exp(-\theta c_{m,k}^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta c_{m,k}^{rs})}$$



$$q_m^{rs} = q_{rs} \Pr(m | rs)$$

手段別OD交通量

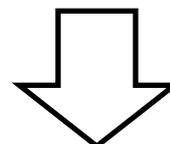
$$\Pr(m | rs) = \frac{\exp(-\eta S_m)}{\sum_m \exp(-\eta S_m)}$$



手段選択確率

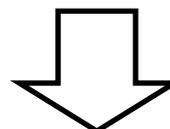
手段別リンク交通量

$$x_a^m = \sum_{r,s,m,k} f_{m,k}^{rs} \delta_{m,a,k}^{rs}$$



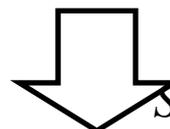
手段別リンクコスト関数

$$t_a^m(x_a^m)$$



$$C_{m,k}^{rs} = \sum_{m,a} t_a^m \delta_{ma,k}^{rs}$$

手段別経路コスト



$$S_m = -\frac{1}{\theta} \log \sum_k \exp(-\theta c_{m,k}^{rs})$$

手段別期待最小費用

モデルと等価な最適化問題

Logit 型 SUE

$$\min .Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_{r,s,m,k} f_{m,k}^{rs} \log f_{m,k}^{rs}$$

Nested Logit SUE



$$\min .Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_{r,s,m,k} f_{m,k}^{rs} \log f_{m,k}^{rs} + \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\theta} \right) \sum_{r,s,m} q_m^{rs} \log q_m^{rs}$$

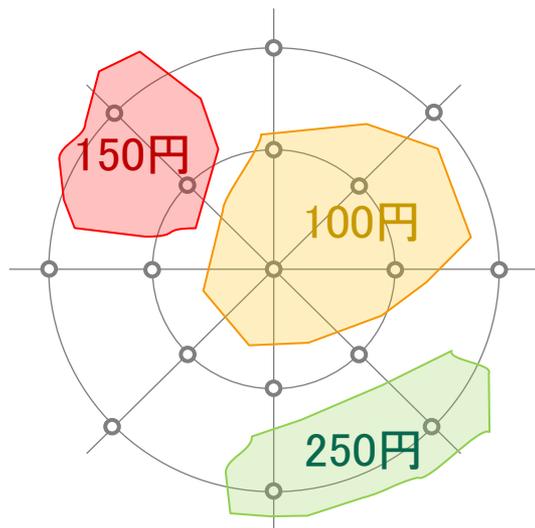
$0 < \eta < \theta$ という条件下で目的関数は狭義凸関数になっている
:解の一意性が証明される (c.f. NLモデルのRUMとの整合性条件)

$$s.t. \sum_m q_m^{rs} = q_{rs}, \sum_k f_k^{rs} = q_{rs}^m, x_a^m = \sum_{rs} \sum_{m,k} \delta_{m,a,k}^{rs} f_{m,k}^{rs},$$

$$q_m^{rs} \geq 0, f_{m,k}^{rs} \geq 0, x_a^m \geq 0$$

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・適用

Optimal Network Congestion Pricing Design Problem Controlling the Shape of Charging Boundary:
Algorithm Development, Applications, and Future Perspectives



高木, 円山, 溝上: 土木学会論文集D3,
Vol. 70, No. 1, pp. 88-101, 2014.

背景: 混雑課金政策

最適混雑課金
First-best Road Pricing

全リンクに対してそれぞれ異なる額を課金する



非現実的

次善混雑課金
Second-best Road Pricing

一部のリンク・区域にのみ課金する

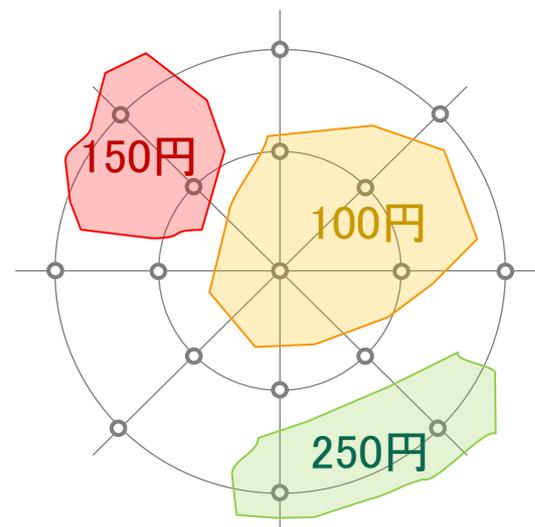


実用的・
研究の余地大

次善混雑課金で決定すべき設計要素

課金方式・課金領域・課金レベル

- これらが政策のパフォーマンスに与える影響は大
- 客観的・合理的な判断による制度設計が必要

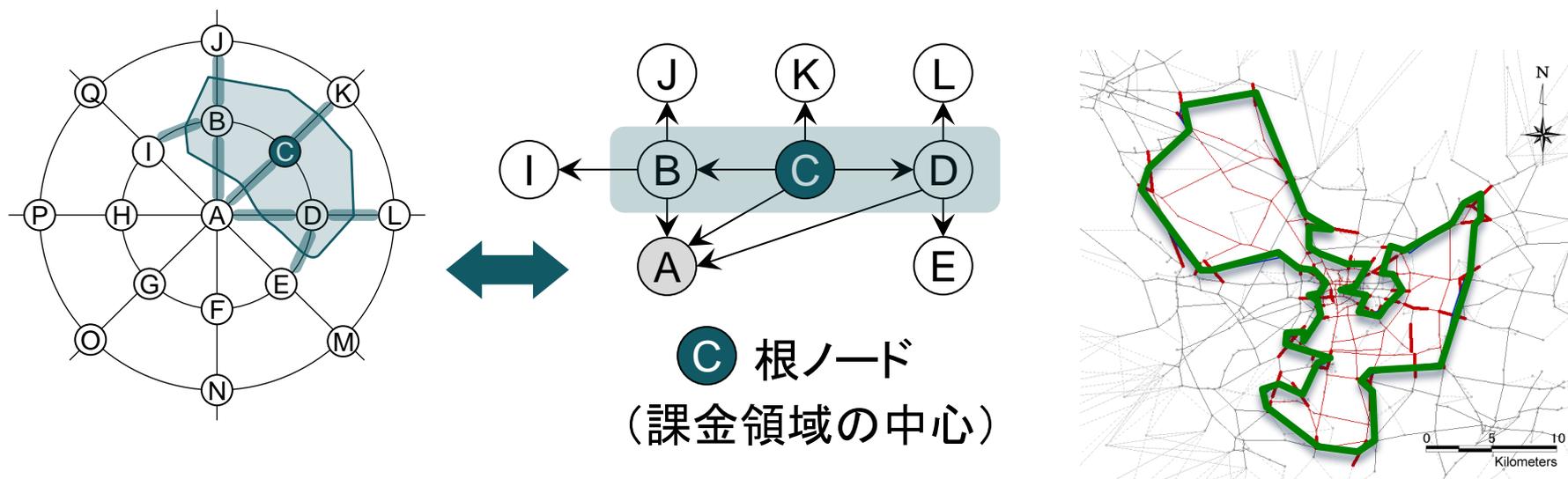


既存の最適設計法（課金領域の表現法）

Branch-Tree 法

(Sumalee 2004)

課金領域を木構造で表現し遺伝的アルゴリズム(GA)で最適化



課題

高木ら (2011)

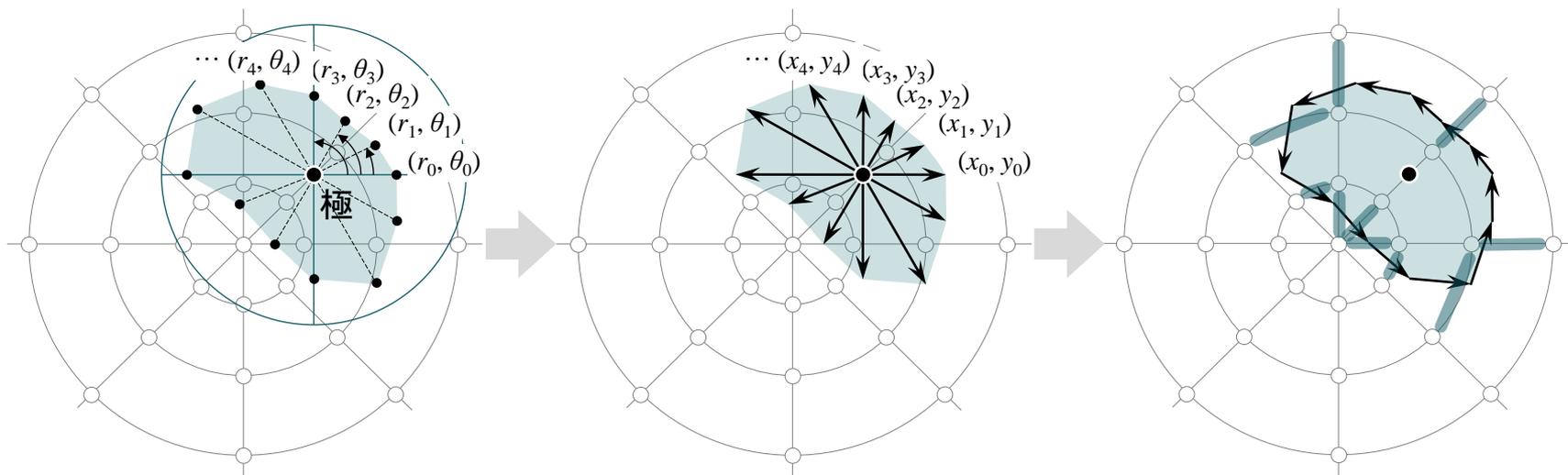
- 計算中の根ノード(=課金領域の中心)の移動が不可
- 形状の制御が困難で非現実的な形状が出力されうる

研究目的

- ▼ 次善課金(エリア・コードン課金)の最適設計において
 - 課金領域の形状制約
 - 中心位置の最適化
 - 複数課金領域の最適化
- が可能な新たな計算法の構築
- ▼ 計算法の実都市への適用と結果の比較

提案手法(極座標による領域表現)

中心座標とそれを基点としたベクトルの集合で
課金領域を表現



- 計算中に中心位置の自由な移動が可能
- 形状制御が容易

計算幾何学 Computational Geometry

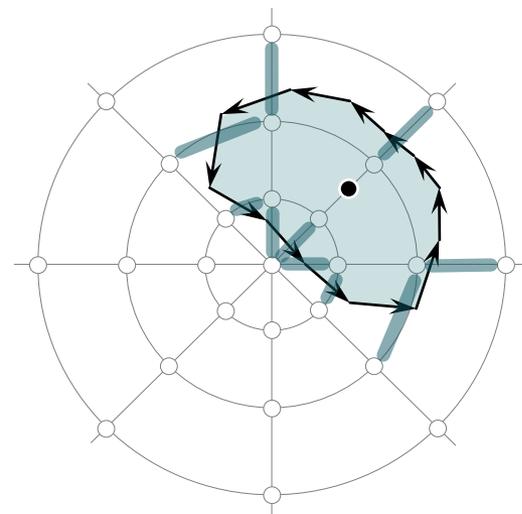
- 空間上の図形(点・線・多角形等)処理を効率的に行うアルゴリズムの開発を行う計算機科学の一分野
- 人間にとって簡単に見える(視覚的には簡単な)問題でも、計算機で解くのはそれほど簡単ではない

- 点の多角形への内外判定(鉛直線算法)

- 線分交差判定問題

⇒ これらの組み合わせで、課金領域の形状情報から課金リンクを効率的に判定

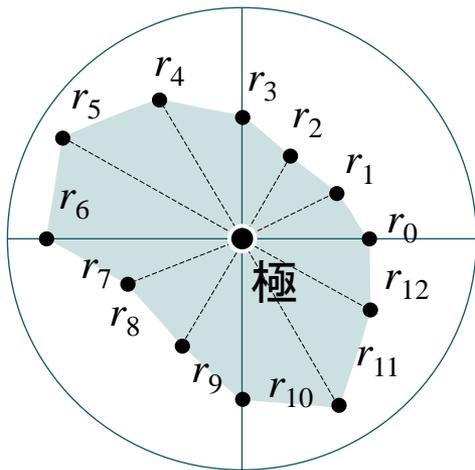
- 「凸包」による領域の現実性の指標化



GAとの適合性

データ構造として木構造を用いたBranch-tree法と異なり、
配列データとして課金領域を表現可能

- ➡ GAと高い親和性
- ➡ Branch-tree法より実装が容易



染色体の構造(データ構造)

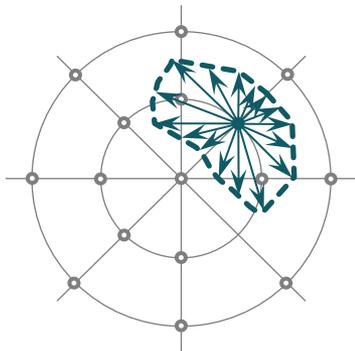
中心座標を表す遺伝子配列

x	y
-----	-----

形状を表す遺伝子配列

r_0	r_1	...	r_{12}
-------	-------	-----	----------

GAオペレーション(交叉)の例



個体A

X	Y	V0	...	V4	V5	V6	V7	V8	...
130.5	32.5	0.5	...	0.8	0.7	0.5	0.7	0.75	...

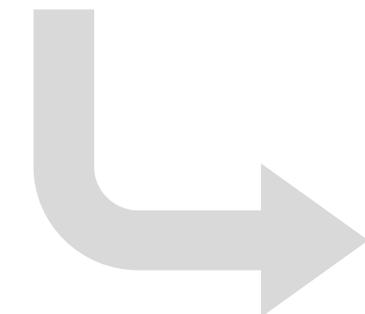
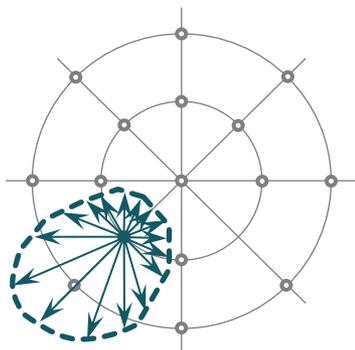
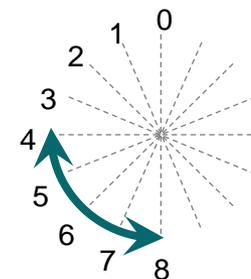
中心位置は平均化もしくは
X,Yいずれかを交換



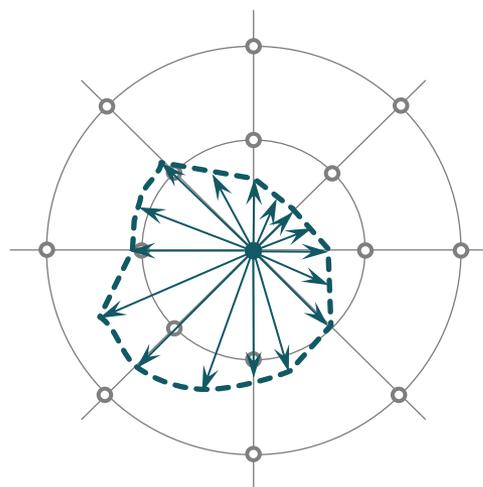
個体B

X	Y	V0	...	V4	V5	V6	V7	V8	...
129.5	31.5	0.4	...	0.85	1.0	1.0	0.9	0.9	...

交叉区間
(V4~V8)



新しい個体A'



手法の比較

○: 適している △: 不向き ×: 適用が困難

branch-tree法

提案手法

中心位置の最適化

×

○

領域形状の制御

×

○

複数課金領域の最適化

△

○

近傍解探索効率

○

△

複雑な領域の表現

○

×

モデルの全体像：2段階最適化問題

上位問題

(社会的余剰の最大化)

$$\max SW = \sum_n \int_0^{h_n} D_n^{-1}(\omega) d\omega - \sum_a x_a t_a(x_a)$$

決定変数：課金領域、課金レベル

制約条件：課金領域の形状制約

所要時間
(混雑状態)

下位問題

(ネットワーク均衡配分)

$$\min Z(\mathbf{g}, \mathbf{h}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_n \sum_{m \in M} \tau_p g_n^m - \sum_n \int_0^{h_n} D_n^{-1}(\omega) d\omega$$
$$h_n = \sum_m g_n^m, x_a = \sum_{m,n} \delta_{a,n}^m g_n^m, x_a \geq 0, h_n \geq 0, g_n^m \geq 0$$

- 下位問題は需要変動を考慮したネットワーク均衡配分 (トリップ・チェーン型)
- 上位問題に制約条件を追加し、計算法を改良した点が本研究の新規性

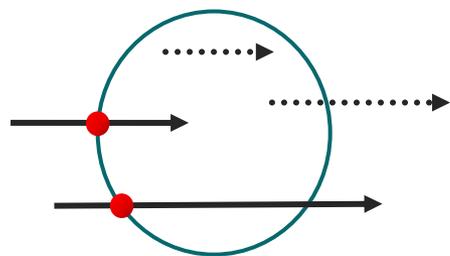
提案手法の実都市への適用

宇都宮ネットワーク

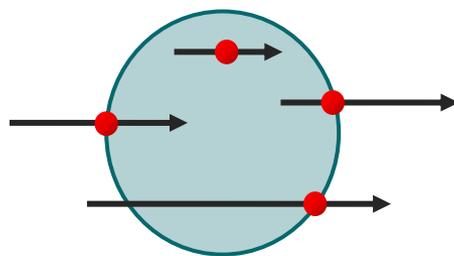
- ゾーン数: 118
- リンク数: 1345
- ノード数: 626

既存研究と同設定として比較可能に

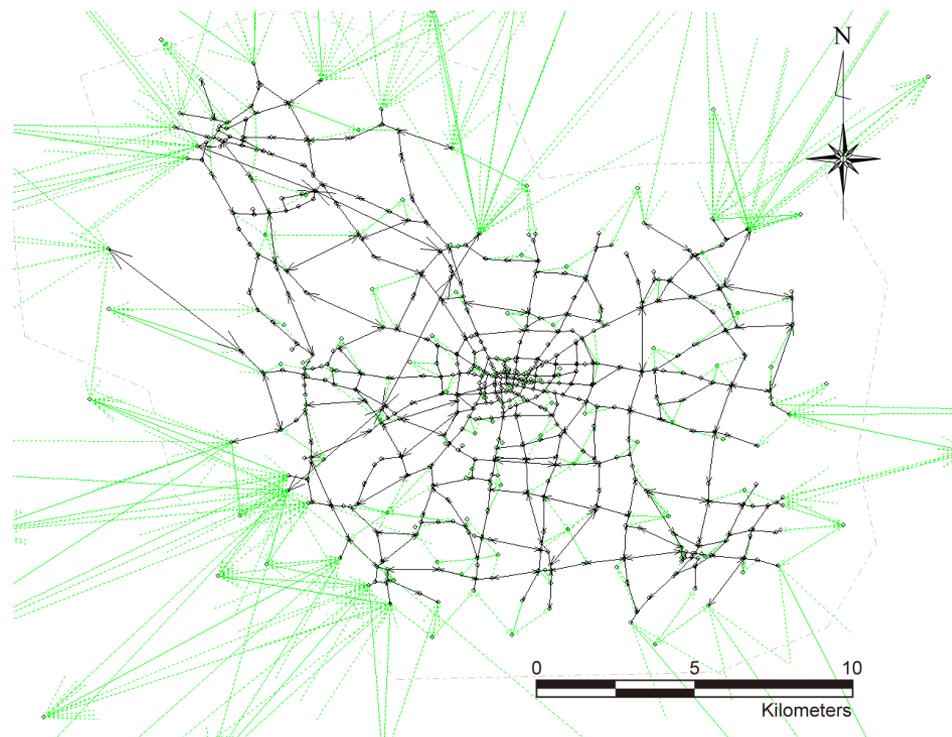
● 課金ポイント



コードン課金

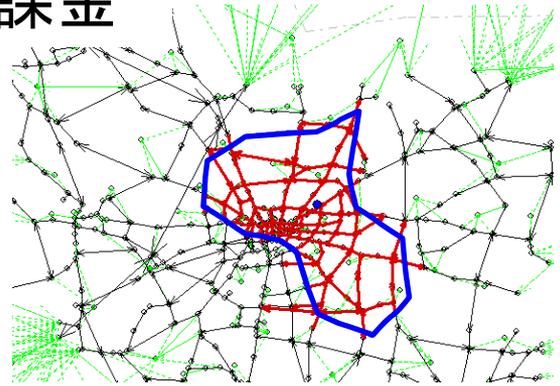


エリア課金

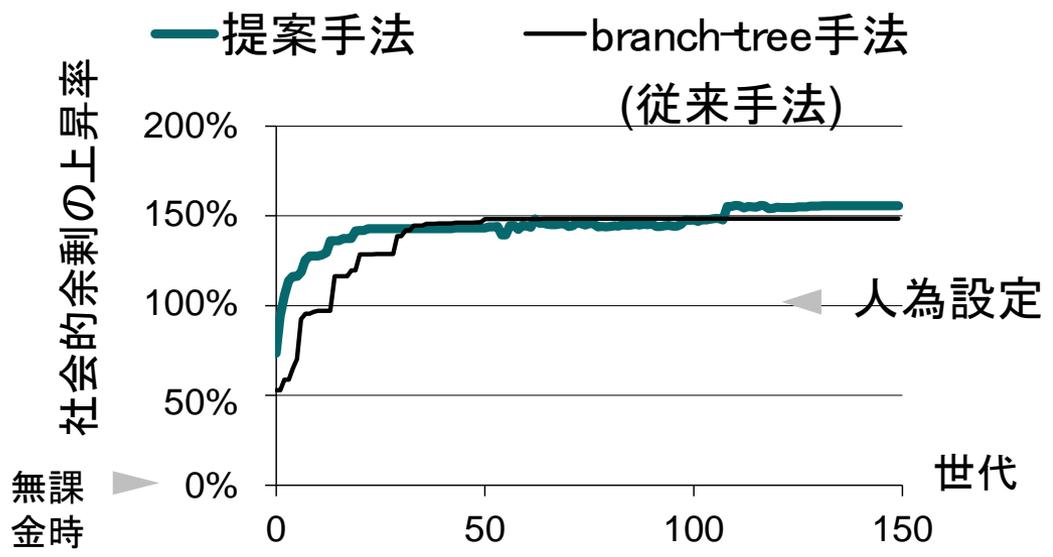


- Maruyama & Sumalee (2007) Efficiency & equity comparison of cordon- and area-based road pricing schemes using a trip-chain equilibrium model, *Transportation Research A*
- 高木, 円山, 溝上 (2011) エリア課金の最適設計問題

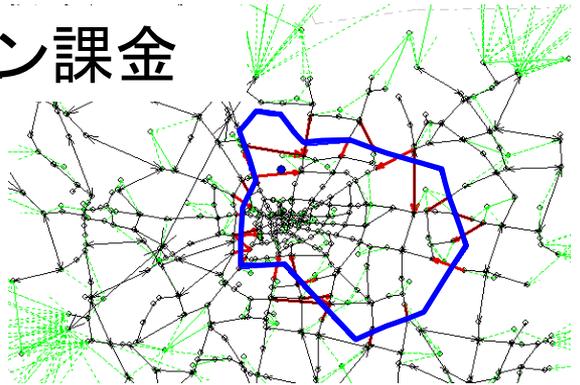
エリア課金



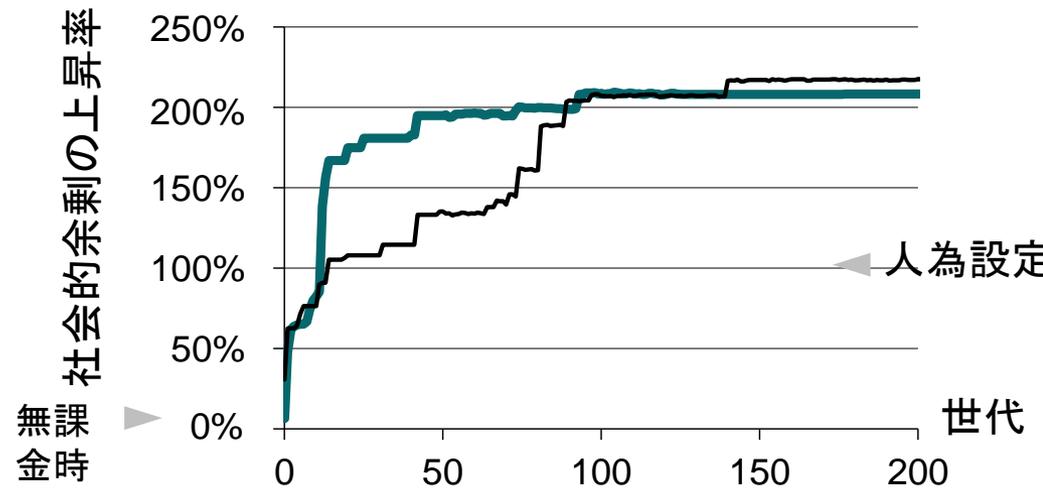
社会的余剰上昇率: 156%↑
課金額 200円 (従来手法: 150%)



コードン課金



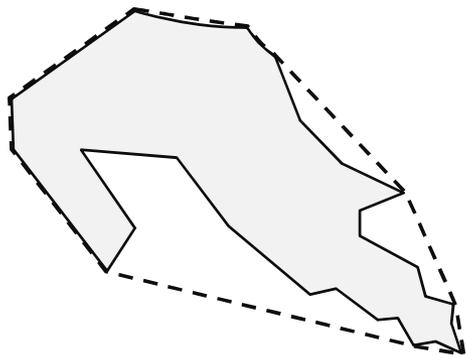
社会的余剰上昇率: 208%↑
課金額 100円 (従来手法: 220%)



社会的余剰最適値: 既存手法と同等
計算初期の社会的余剰の上昇速度: 提案手法が**高速**

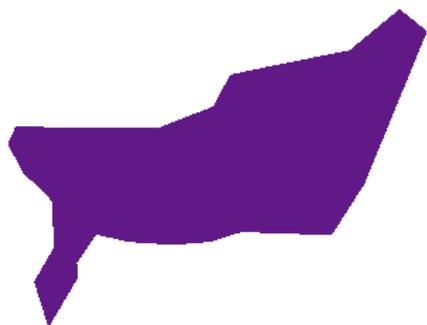
凸包による領域の非現実性指標の提案

凸包: ある点群 (課金領域) を含む最小の凸多角形



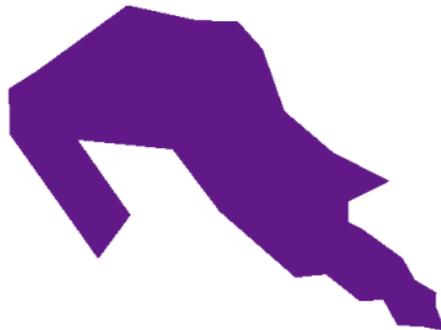
$$I = \frac{\text{課金領域の面積}}{\text{課金領域の凸包の面積}}$$

既存研究
エリア



$I = 0.740$

既存研究
コードン



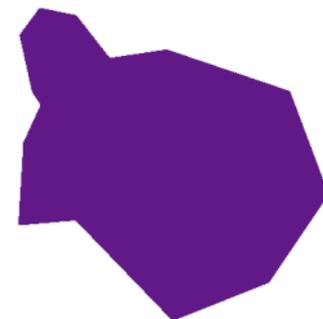
$I = 0.696$

本研究エリア



$I = 0.828$

本研究コードン



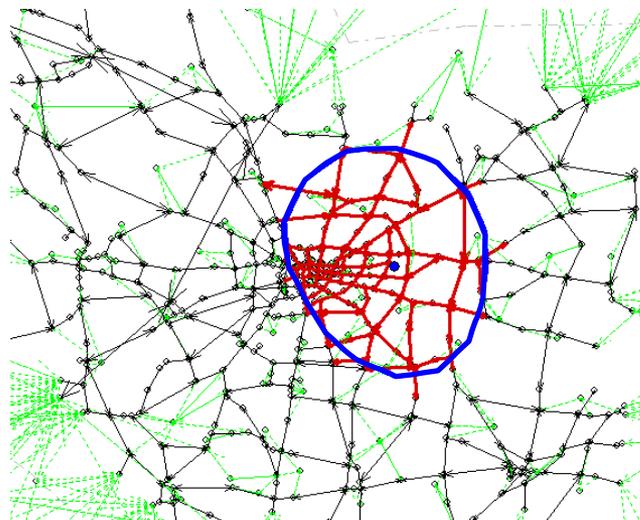
$I = 0.921$

形状制限を設けた最適設計

現実性の高い領域の条件

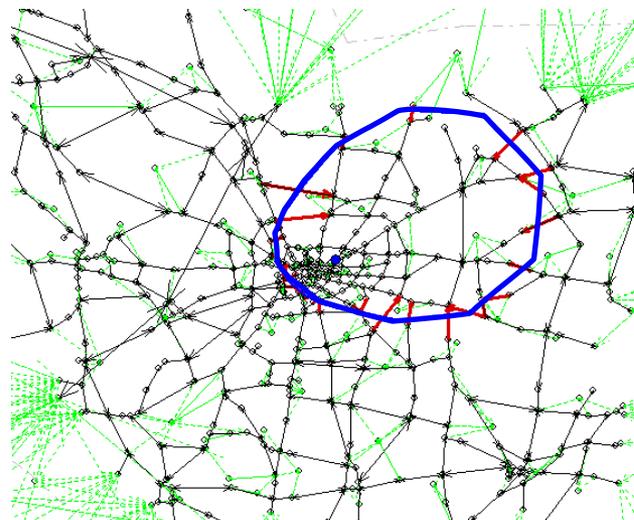


課金領域が凸である



エリア課金(上昇率: 132%)

$$I = 1.00$$



コードン課金(上昇率: 151%)

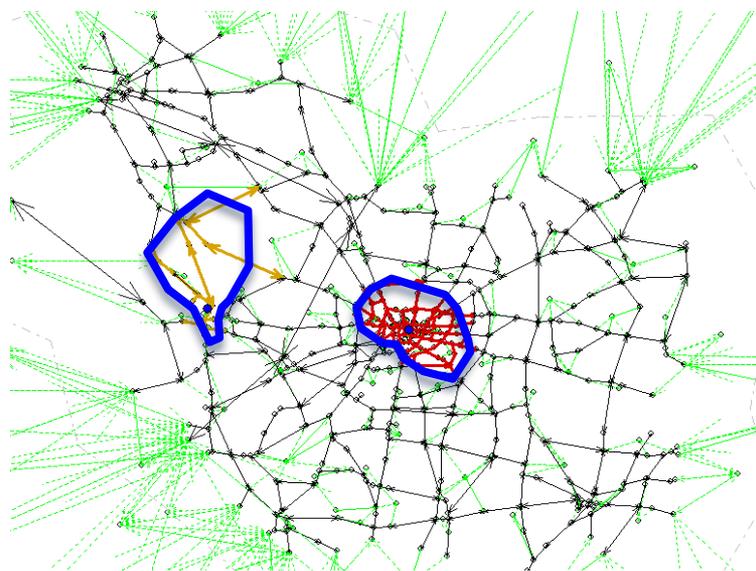
$$I = 1.00$$

制限を設けない条件下の解と比較:

- 形状の凹凸が抑えられた現実性の高い解
- 社会的余剰の上昇率は減少

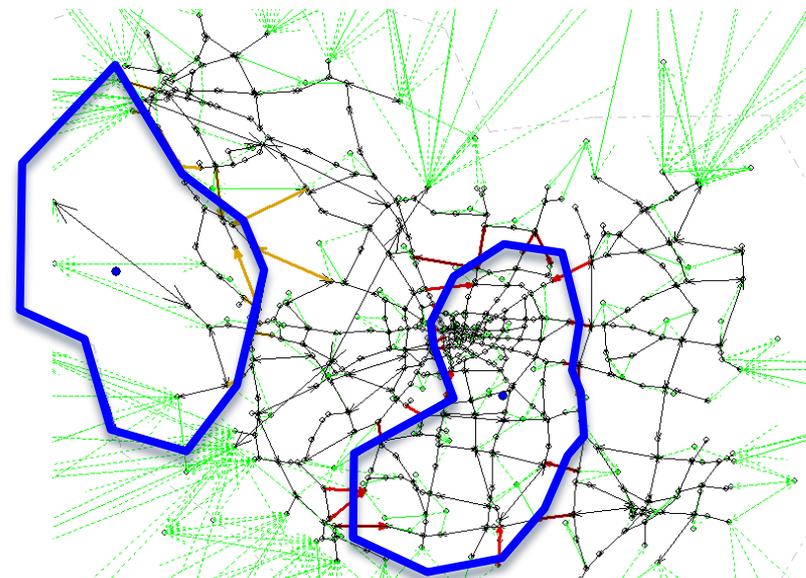
複数課金領域の最適化

- 若干の改良(衝突回避操作)で複数領域の最適化も可能



二重エリア課金

社会的余剰上昇率: 178%



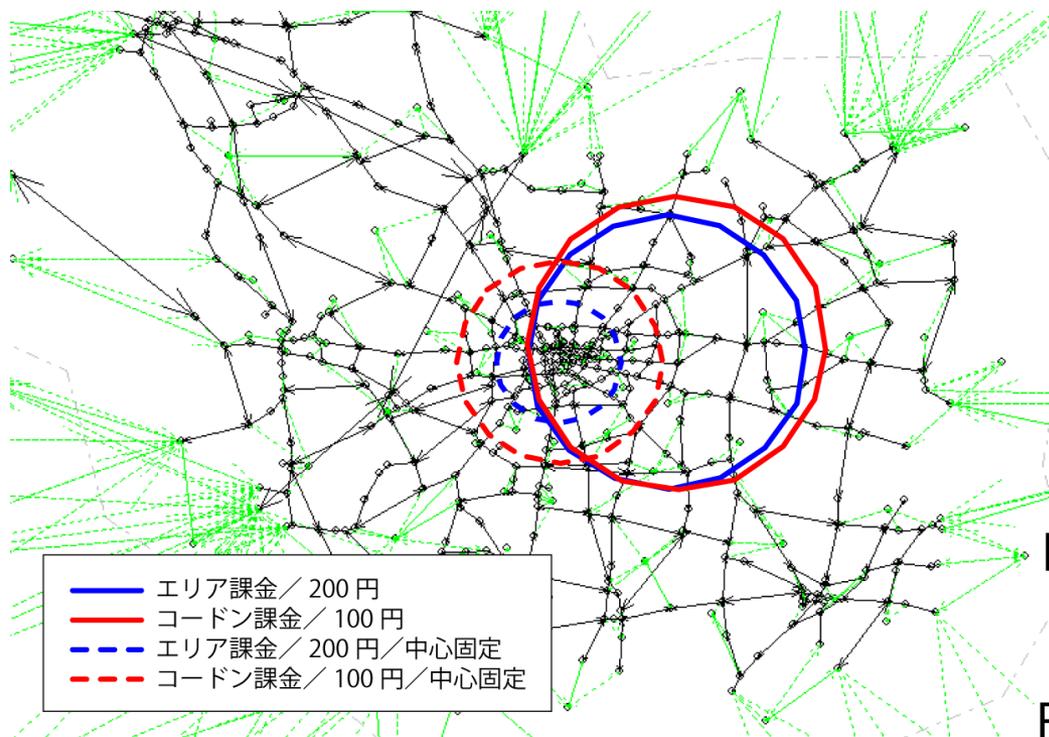
二重コードン課金

社会的余剰上昇率: 230%

- 領域形状制約なし
- 単一エリア156%↑、単一コードン 208%↑と比較すると複数領域化で社会的余剰の増加が確認可能

領域の最適化の効果の抽出

- エリア課金額200円, コードン課金額100円で固定
- 円形領域を想定: 直径のみを最適化/中心も最適化

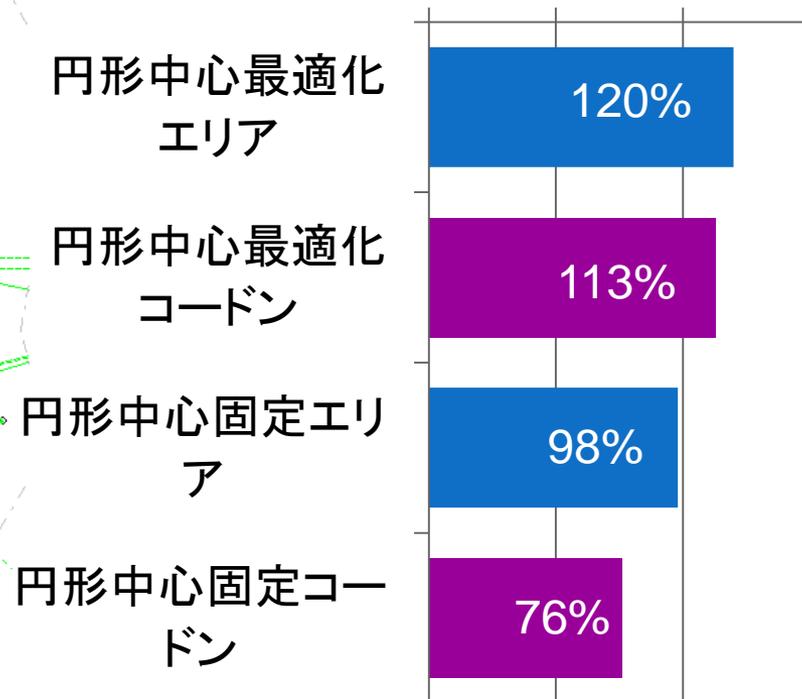


円形領域を想定した最適領域群

最適領域の大きさ: エリア < コードン

社会的余剰の上昇率

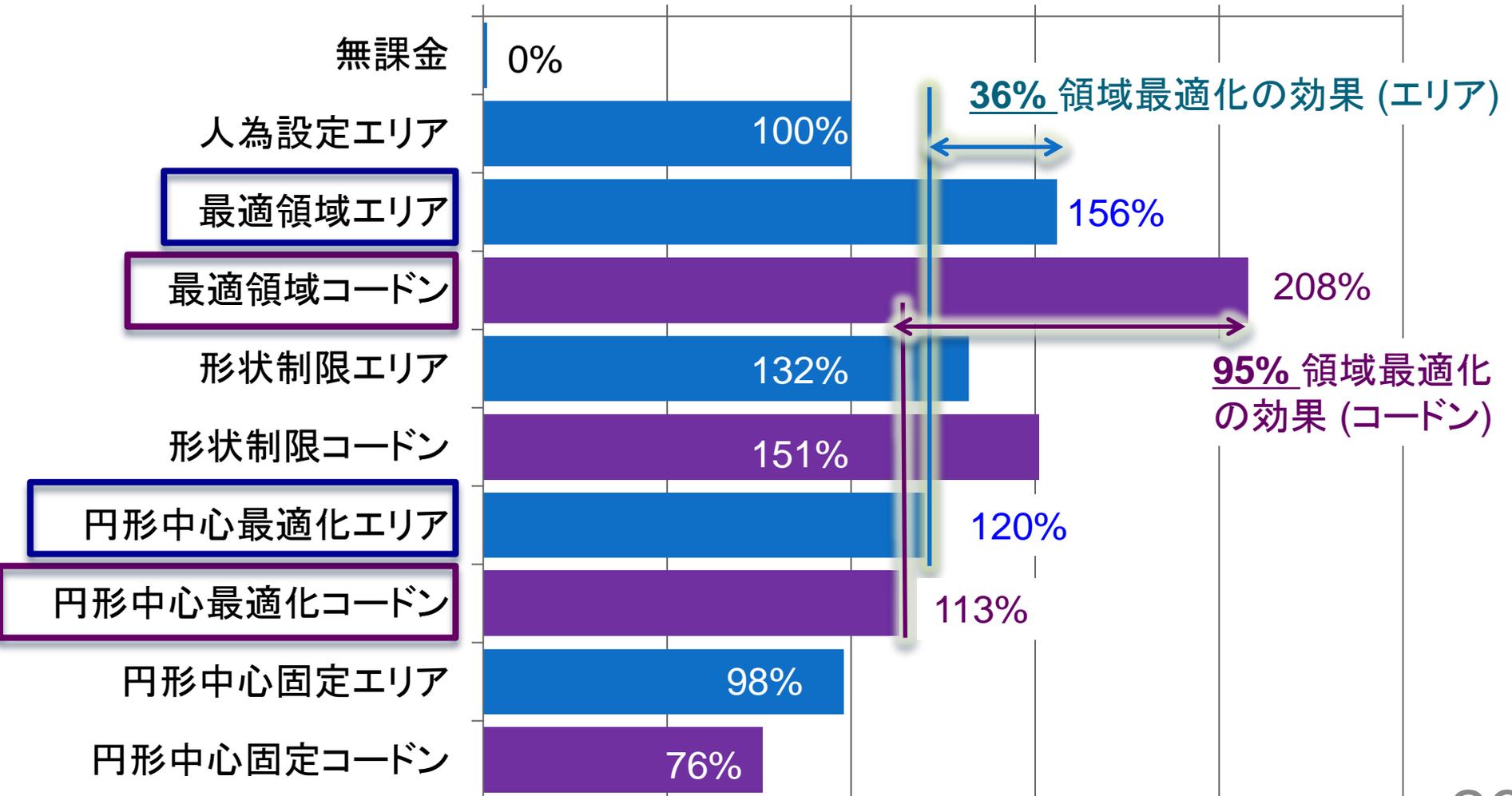
0% 50% 100% 150%



次善課金の最適化の効果分析まとめ

社会的余剰の上昇率

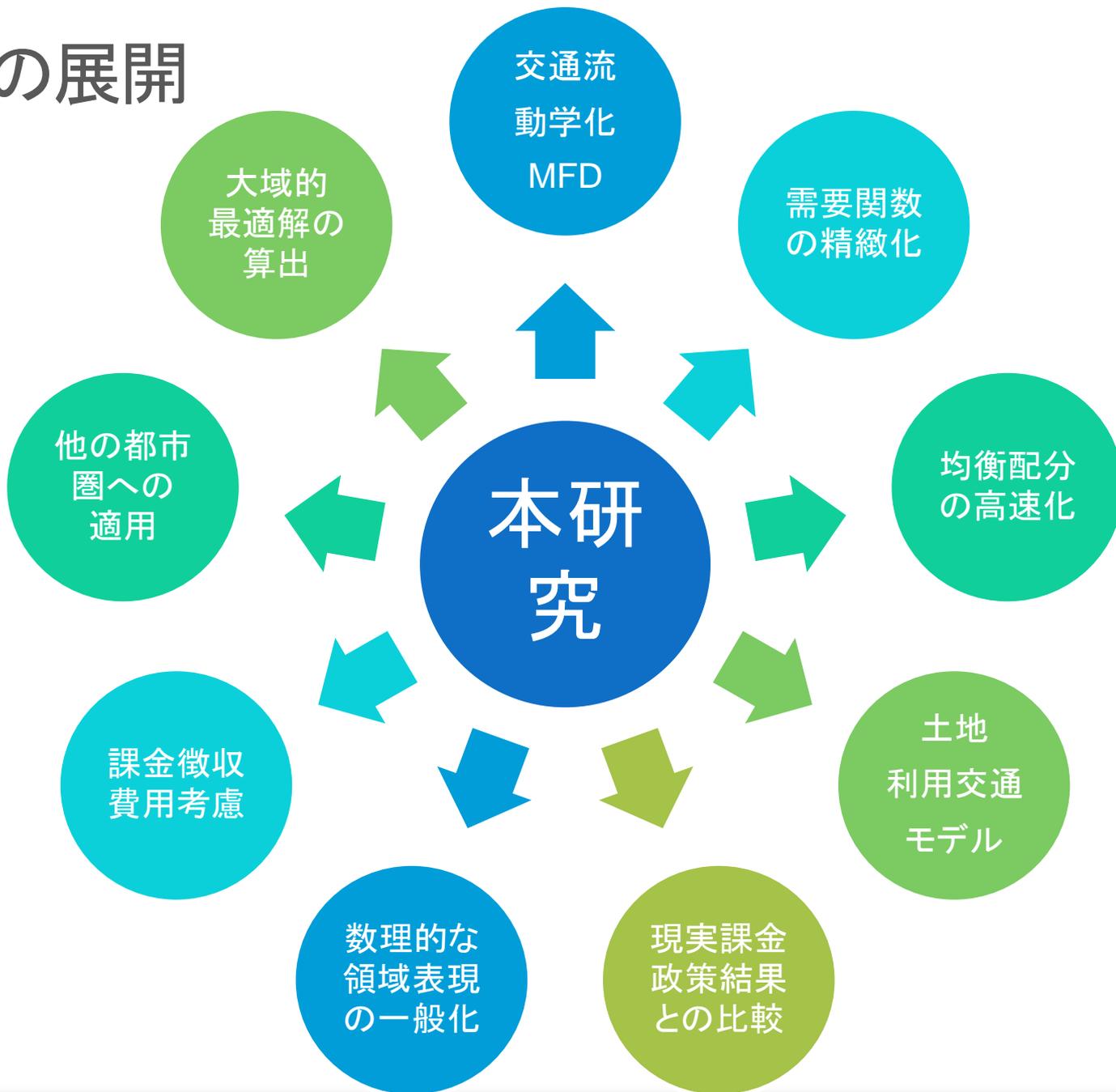
0% 50% 100% 150% 200% 250%



まとめ

- 形状制約が可能で、課金領域の中心位置の最適化も考慮した次善混雑課金の最適領域の計算法開発
- 課金領域の形状制約 (=凸領域) 下で最適設計の計算例を例示
 - 制限なし条件と比較して社会的余剰は減少
 - より現実的な領域が生成される
- 複数領域を考慮した計算法の開発と適用
 - 単一課金領域時よりも社会的余剰の上昇事例を提示
- 領域の最適化の効果抽出
 - 特にコードン課金で領域の最適化の効果が大きい

今後の展開



展開の詳細 (1)

- 交通流モデルの動学化

- Eliasson et al (2013) スtockホルムの事例から静的配分による予測は、渋滞緩和を過小評価と実証
- Zheng et al (2012) MFDを用いたコードン課金の最適化

- アルゴリズムの改良

- Zhang & Sun (2013) コードン領域の数理的表現に成功
- リンクコスト関数の折れ線近似による大域的最適解の導出法 (Ekstrom et al. 2012)
- 均衡配分の高速度化 (TAPAS法 Bar-Gera et al. 2013)

Eliasson et al. (2013) Accuracy of congestion pricing forecasts, *Transportation Research A*
Zheng et al.(2012) A dynamic cordon pricing scheme combining the MFD and ..., *TRA*
Zhang & Sun (2013) A dual-based heuristic for optimal cordon pricing design, *J. Trans Eng.*
Ekstrom et al. (2012) Optimizing toll locations & levels using a mixed integer ... *TRB*

展開の詳細 (2)

- 都市構造の影響分析

- 集約型/拡散型都市構造と最適課金形式の比較分析
- 土地利用交通モデルとの統合

- 需要関数の精緻化と改良

- トリップ・チェーン交通量の直接需要関数
⇒ 例えば, Network GEV型の需要代替を考慮した需要関数へ
- **拡大係数付与**手法(=将来のPTマスターデータを作成)による簡便な将来予測

現状マスターデータ

属性	発	着	拡大係数

現状の年齢別人口分布に合うように拡大係数を付与 ↑

将来マスターデータ

属性	発	着	拡大係数

将来の**予測**年齢別人口分布に合うように拡大係数を推定 ↑

ご清聴ありがとうございました。