

# 都市交通システムの環境効率性に関する研究

---

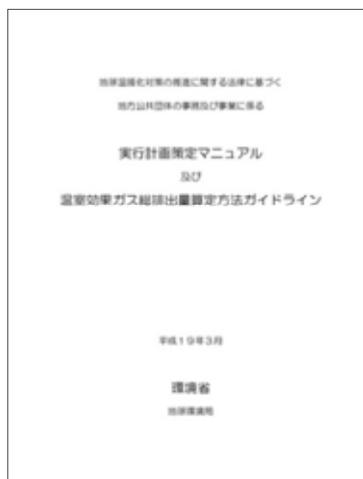
広島大学大学院国際協力研究科  
藤原章正



# 運輸部門におけるCO<sub>2</sub>削減可能量の推定

# 地球温暖化を取り巻く我が国の状況

- ▶ **マクロな対策からミクロな対策へ**  
→ 国家レベルのみならず **地方公共団体レベル**での自主的・積極的な対策が必要である（「地球温暖化対策の推進に関する法律」に記載）
- ▶ **運輸部門からのCO<sub>2</sub>排出量抑制の重要性**  
→ 運輸部門は全体の**約17%**（産業部門（約38%）に次いで多い）  
→ 産業部門は基準年（1990年）に対して**2.3%減**に対し、運輸部門は**14.6%増**
- ▶ **持続可能性の視点の重要性**  
→ **モビリティの維持向上**と**環境負荷低減**のバランスを見極めることが重要



環境省地球環境局

## 「実行計画策定マニュアル及び 温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン」

P.23 「（温室効果ガス削減に関して）実行計画の点検・評価の場面で客観的な判定が行えるよう、**可能な限り数量的な目標を掲げることが望ましい**」

ただし、**具体的な数値目標の設定方法**については記載なし

# モチベーション

## 数値目標の重要性

- 各種環境施策の具体化・実施支援のためには数値目標の設定が重要
- 目標設定にあたっては客観的・科学的に設定することが必要

## 各地区の身の丈に合った実効性の高い環境負荷削減目標

- 机上の空論で終わらない実現可能な目標の設定が重要
- 各地区の自然的社会的条件と持続可能性（モビリティと環境負荷のバランス）を考慮

**DEAに基づく環境効率性指標を用いた削減目標値の設定**

# 環境効率性 (Environmental Efficiency) とは？

Senbil et al. (2005) が提案する環境効率性の定義

$$\text{環境効率性} = \frac{\text{環境負荷要因 (人口, 自動車保有率, 走行台キロ など)}}{\text{環境負荷量 (CO}_2\text{ 排出量 など)}}$$

## ▶ 環境効率性の導入によって

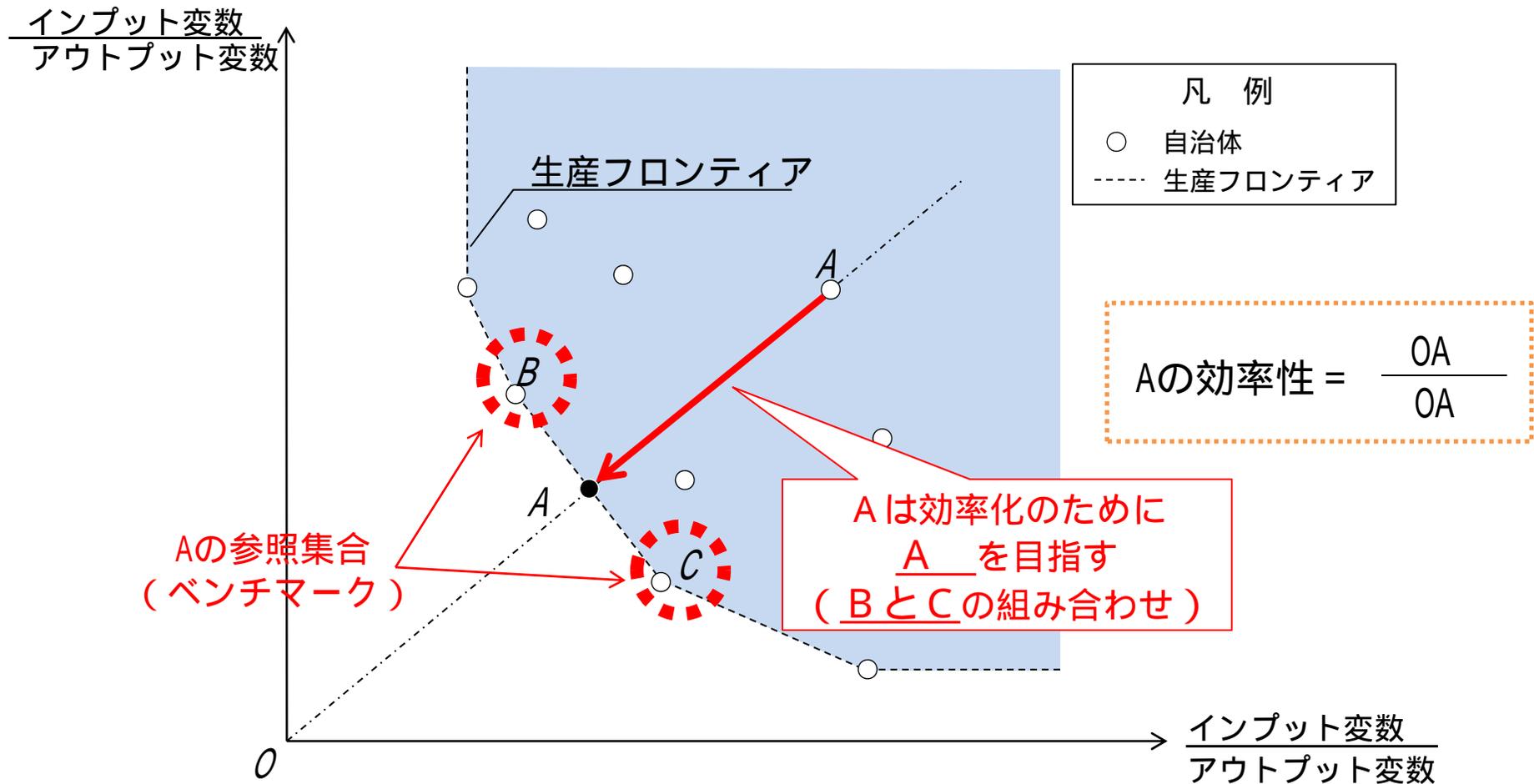
- ・ モビリティ水準と環境負荷量を同時に評価することが可能
- ・ 効率性をもとに、各地区の環境負荷削減目標を設定することが可能

## ▶ DEA (データ包絡分析) をベースモデルとして環境効率性を算出することによって (Yoshino et al. (2010))

- ・ 各地区の自然的社会的特性 (都市の異質性) を踏まえた環境負荷の排出構造の評価が可能
- ・ 現実都市をベンチマークに据えることによる目標設定手法であるため、目標のイメージが分かりやすく、現実性がある程度確保される

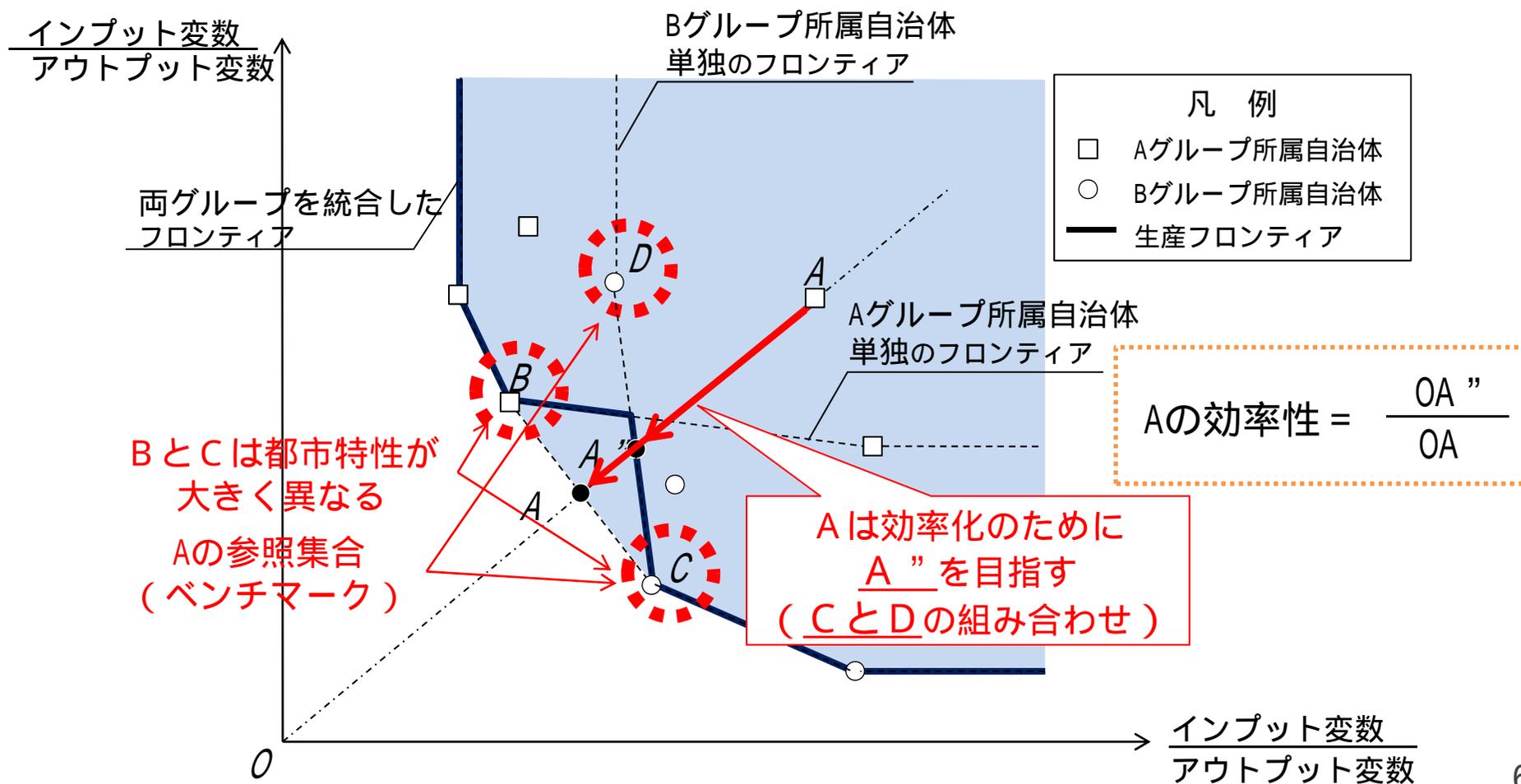
# DEA (データ包絡分析) とは?

- ▶ Charnes et al. (1978) によって開発された経営分析モデル
- ▶ 最も優れたパフォーマンス (少ない入力で多くの出力を得ること) を示す事業体をもとに生産フロンティアを設定
- ▶ 生産フロンティアをベンチマークとして他の事業体を相対的に評価



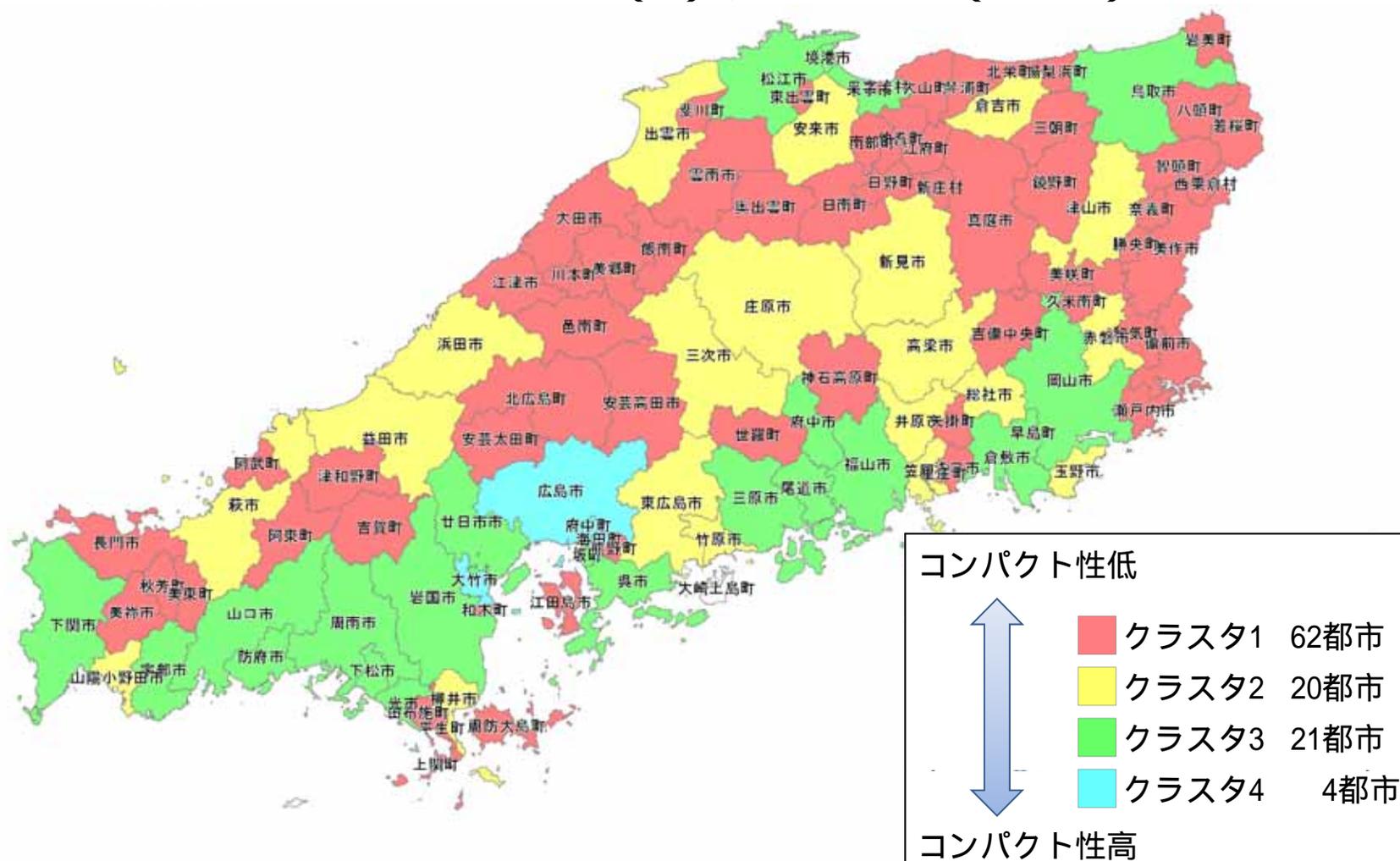
# 環境効率性評価モデルの構築～制約条件の変更

- ▶ 都市特性が大きく異なる組合せをベンチマークとして選定した場合、得られる改善案が現実的でなくなる可能性がある
- ▶ ベンチマークの組合せは同じタイプの都市になるよう、制約条件を設定
- ▶ 都市のグループ分けはア prioriに与える必要あり



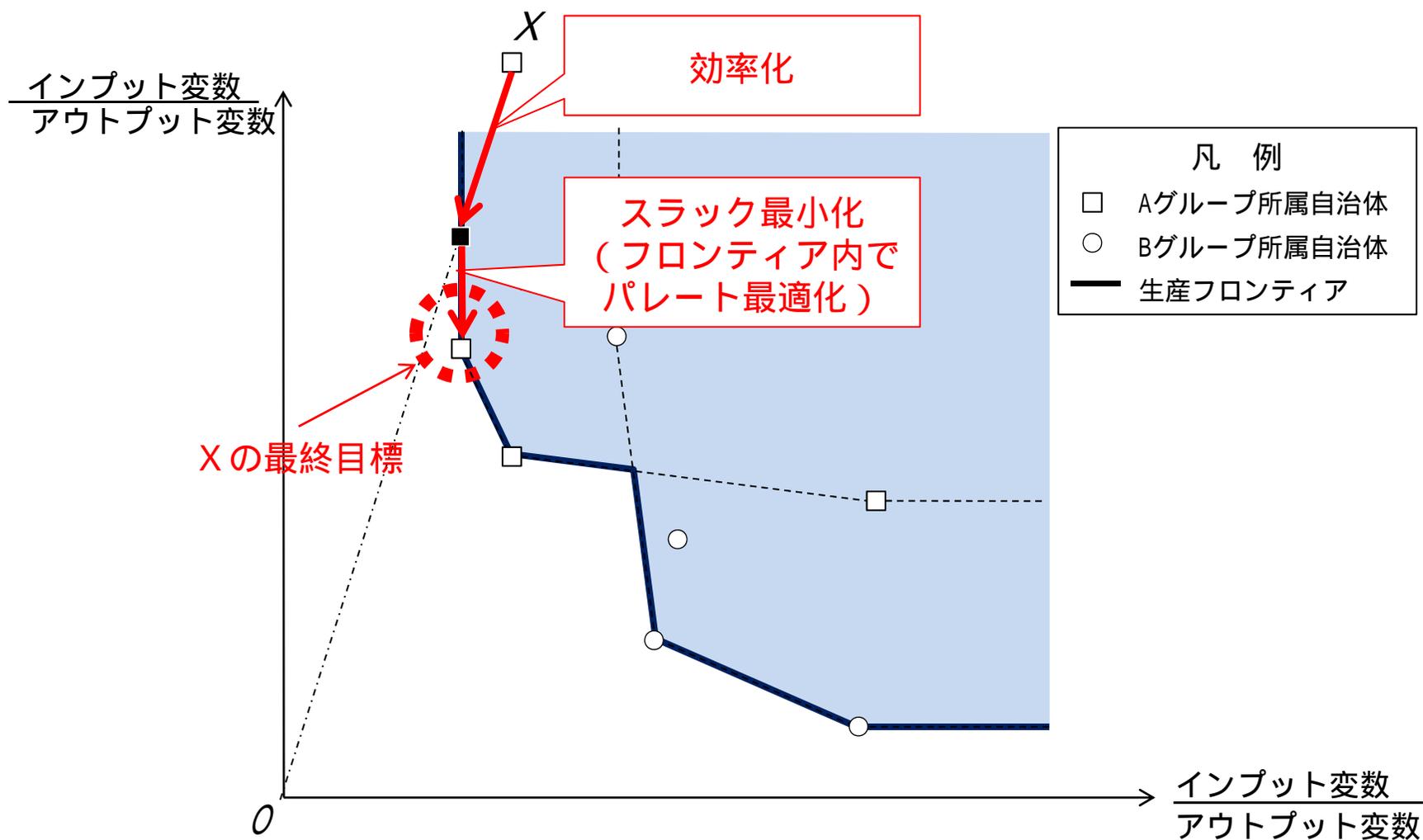
# 自治体の分類（クラスター分析）

- ▶ 自治体のグループ分けはクラスター分析によって実施  
説明変数：D I D人口比率（％）、道路密度（m/km<sup>2</sup>）



# 環境効率性評価モデルの構築～スラック変数の算出

- ▶ フロントティア上でもスラックと呼ばれる入力の余剰・出力の不足が発生
- ▶ パレート最適化のためにはスラックを最小化する必要がある



# 環境効率性評価モデル

## ▶効率性算出式

目的変数

$$\text{Min } \theta$$

制約式

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n x_{ij} \lambda_{Bj} \leq \theta x_{ik},$$
$$(i = 1, 2, \dots, m),$$

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n y_{rj} \lambda_{Bj} \geq y_{rk},$$
$$(r = 1, 2, \dots, s),$$

$$\sum_{j=1}^{n'} \lambda_{Aj} = z_A,$$

$$\sum_{j=n'+1}^n \lambda_{Bj} = z_B,$$

$$z_A + z_B = 1,$$

$$\lambda_{Aj} \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n'),$$

$$\lambda_{Bj} \geq 0, \quad (j = n'+1, \dots, n),$$

$$z_A, z_B = 0 \text{ or } 1.$$

## ▶スラック変数算出式

目的変数

$$\text{Max } \sum_{i=1}^m d_i^x + \sum_{r=1}^s d_r^y$$

制約式

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n x_{ij} \lambda_{Bj} + d_i^x = \theta^* x_{ik},$$
$$(i = 1, 2, \dots, m),$$

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n y_{rj} \lambda_{Bj} + d_r^y = y_{rk},$$
$$(r = 1, 2, \dots, s),$$

$$\lambda_{Aj} \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n'),$$

$$\lambda_{Bj} \geq 0, \quad (j = n'+1, \dots, n),$$

$$d_i^x \geq 0,$$

$$d_r^y \geq 0.$$

# 入出力データ

## ▶入力変数（環境負荷要因：値が小さいほど望ましい）

- ・自動車保有台数（台/世帯）
- ・通勤時自動車分担率（％）
- ・【**順位逆転**】貨物車平均輸送トン数（トン/台）
- ・1人当たり渋滞損失時間（時間/年）

## ▶出力変数（環境負荷量：値が大きいほど望ましい）

- ・【**順位逆転**】1人当たり運輸部門CO<sub>2</sub>排出量（kg-CO<sub>2</sub>/人）

### 市町村別運輸部門CO<sub>2</sub>排出量の推計

道路交通センサスOD調査データに基づく自動車起因の排出量推計手法を採用（松橋ら（2004）が提案）

- 走行台キロに車種別排出係数を乗じることで算出
- 走行台キロは発地ベースで集計（居住者・地元企業の排出の評価を実施）

### 走行台キロ集計のイメージ



給油地

経由地



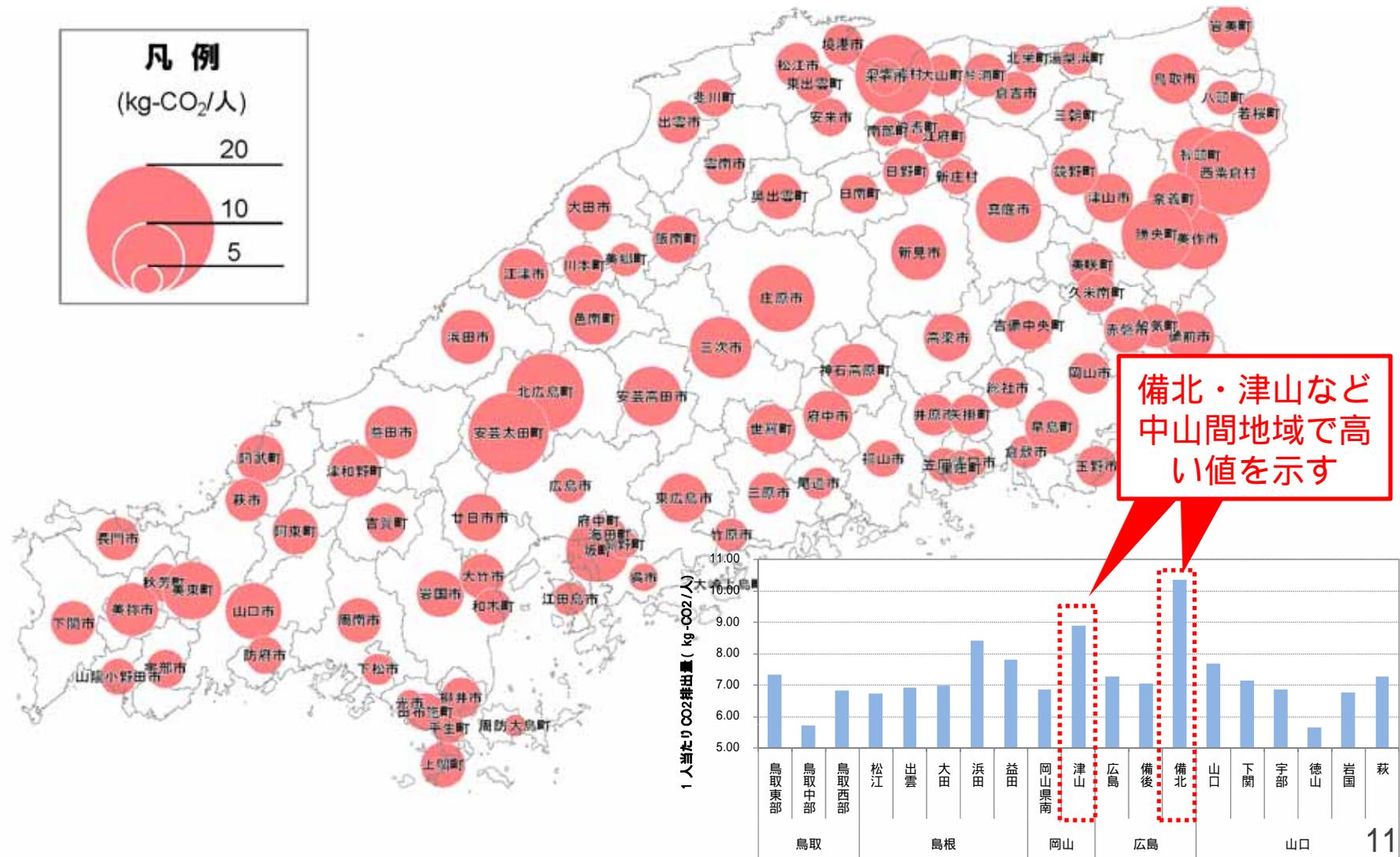
出発地



目的地

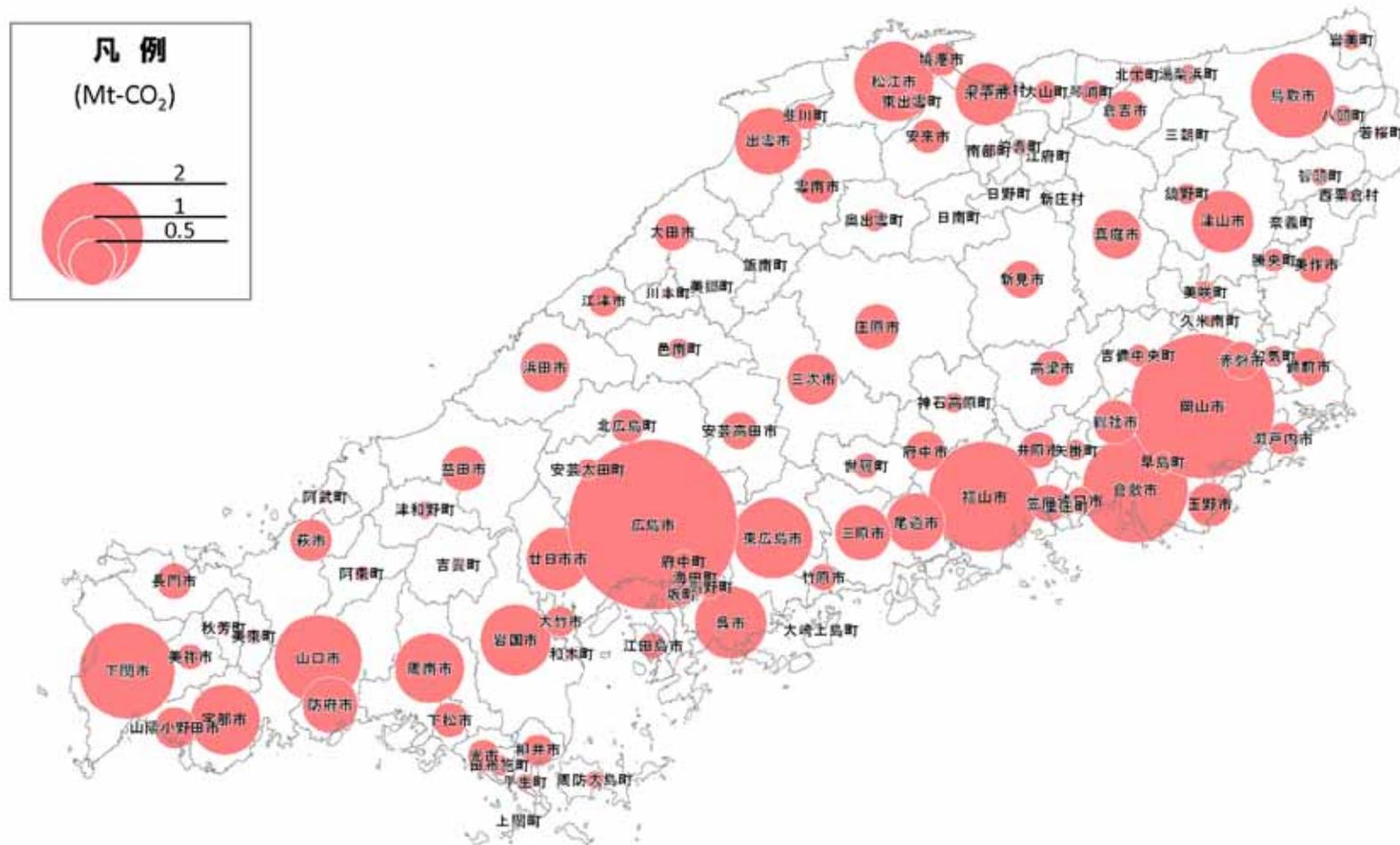
# 市町村別 1 人当たり CO<sub>2</sub> 排出量の推計結果

- ▶ 1 人当たり CO<sub>2</sub> 排出量は **中山間地域** で高い傾向が見られる



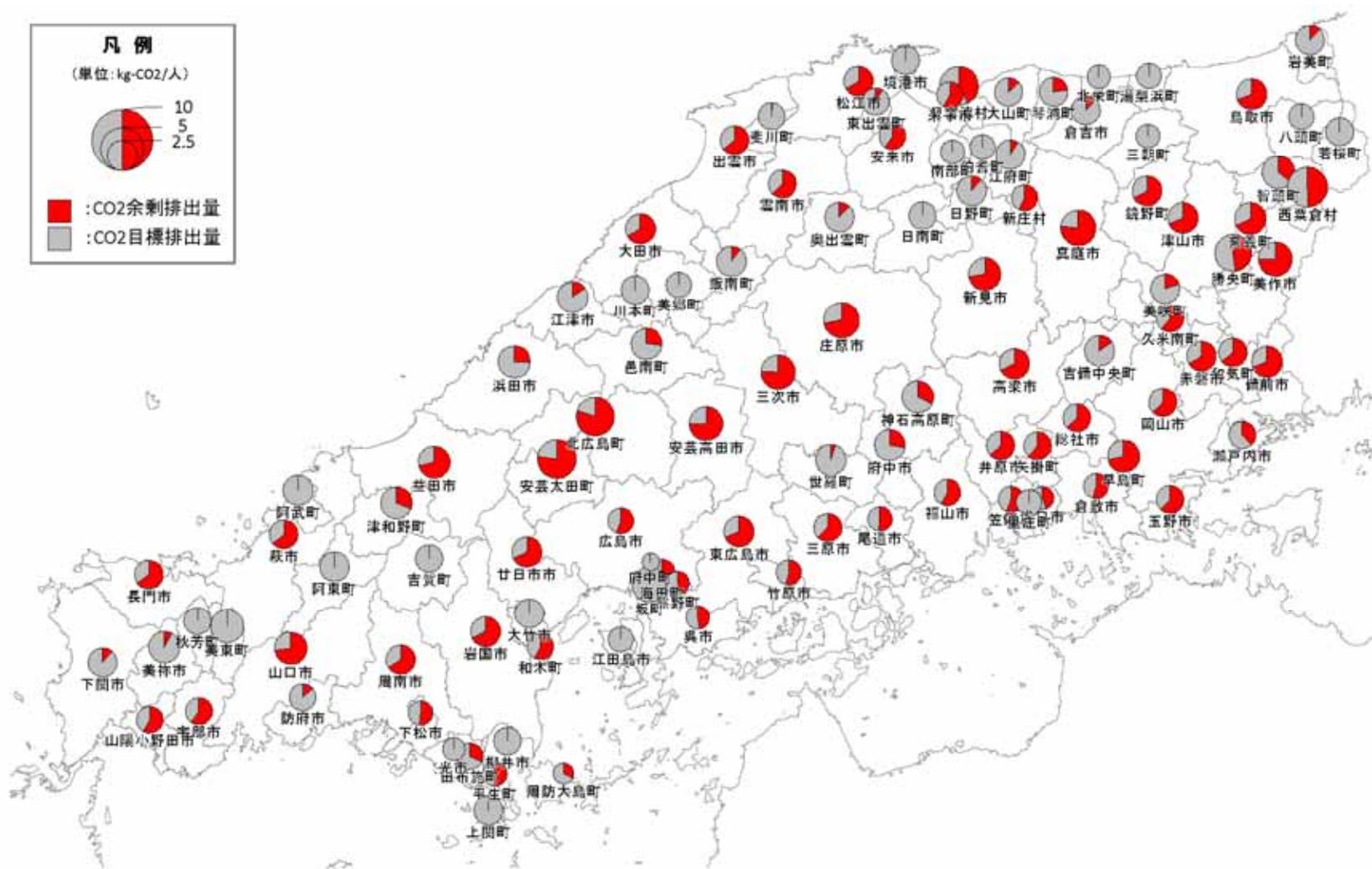
# 【参考】市町村別CO<sub>2</sub>排出量（総量）の推計結果

- 市町村別排出量は広島市・岡山市をはじめ、**山陽地域**で比較的大きい値を示す



# CO<sub>2</sub>削減可能量の算出

- ▶ 中山間地域・山陽地域を中心に削減の余地が大きい傾向が見られる



# フロンティア自治体

▶ 府中町（広島県）はクラスターを超えて多くの都市に参照されている

クラスター1		クラスター2	
フロンティア	参照先 都市数	フロンティア	参照先 都市数
三朝町 (鳥取県)	4	該当なし	
北栄町 (鳥取県)	1		
南部町 (鳥取県)	2		
伯耆町 (鳥取県)	2		
日南町 (鳥取県)	2		
川本町 (島根県)	9		
江田島市 (広島県)	33		
上関町 (山口県)	16		
美東町 (山口県)	1		
阿武町 (山口県)	15		
阿東町 (山口県)	9		
クラスター3			
フロンティア	参照先 都市数	フロンティア	参照先 都市数
境港市 (鳥取県)	1	大竹市 (広島県)	7
坂町 (広島県)	1	府中町 (広島県)	60

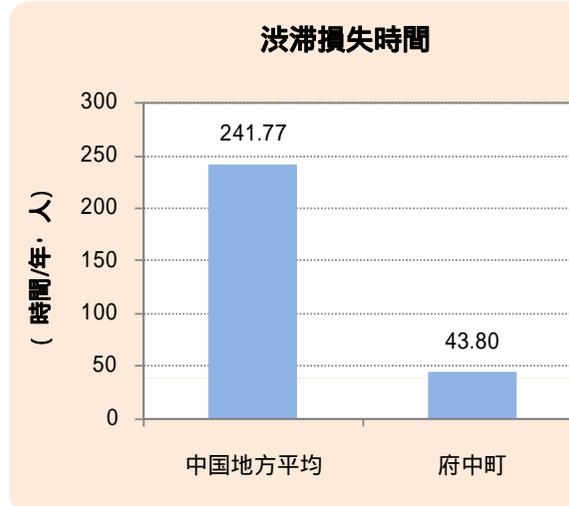
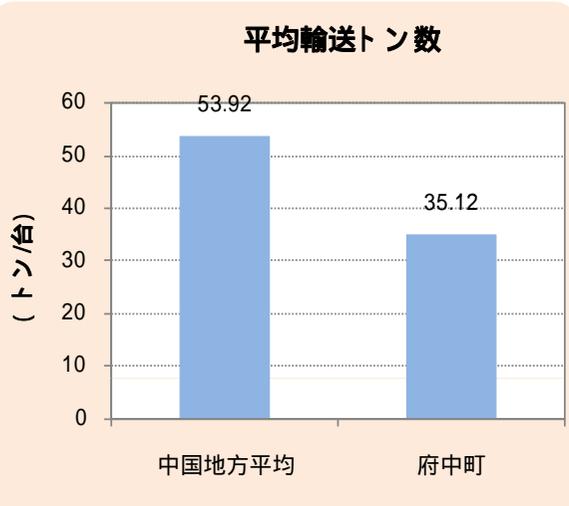
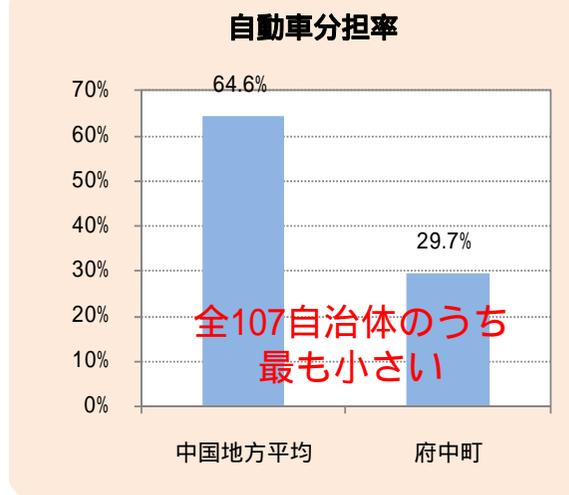
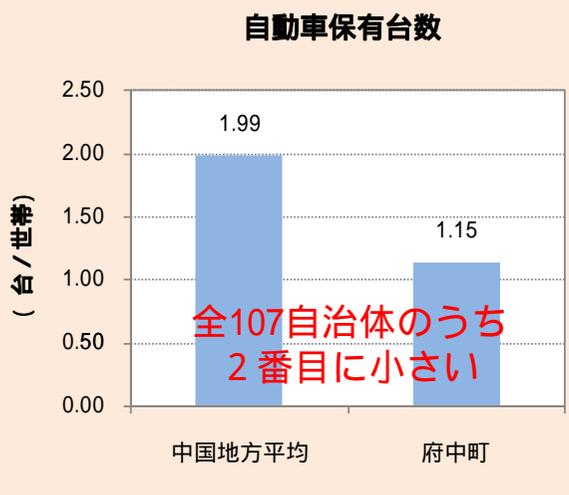
多都市に参照されている  
(例)

- ・広島市
- ・松江市
- ・岡山市 など

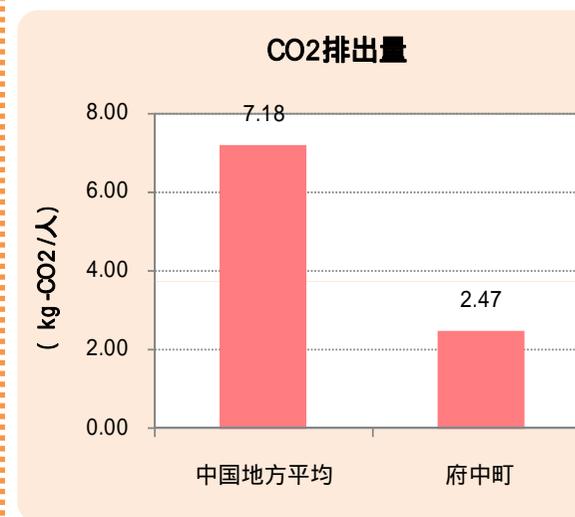
# フロンティア自治体(府中町の場合)

▶ 府中町の場合、自動車利用が抑制されていることでCO<sub>2</sub>排出量が抑制されている

▶ 入力変数  
値が小さいほど望ましい(輸送トン数は大きい方が望ましい)



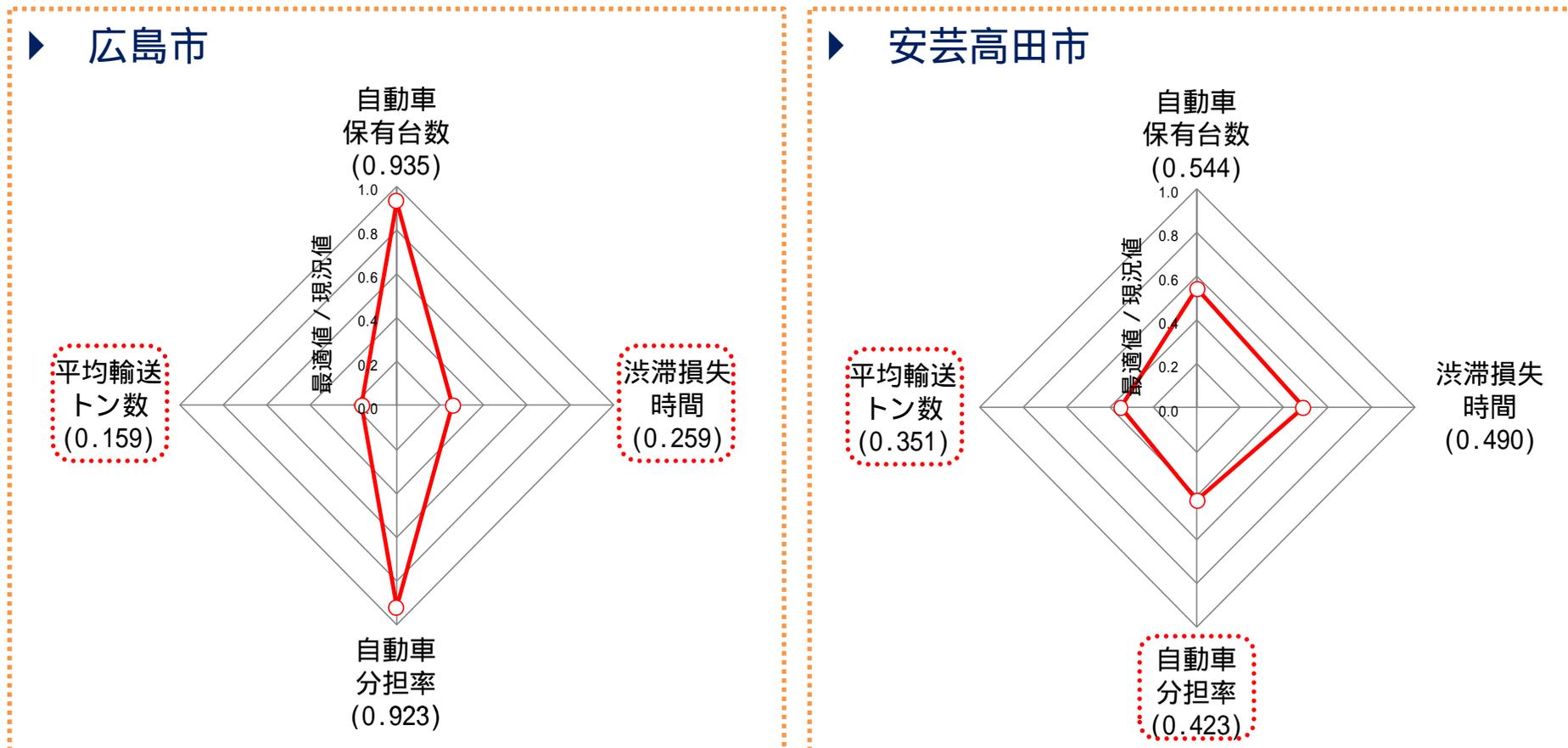
▶ 出力変数  
値が小さいほど望ましい  
(順位逆転前の数字のため)



全107自治体のうち  
最も小さい

# 改善案の検討

- ▶ 効率値とスラック変数によって、各地区の改善案の検討が可能



## 指標から得られる改善案の方向性

- ▶ 自動車保有台数 → 保有台数の抑制：相乗り・カーシェアリング
- ▶ 平均輸送トン数 → 積載量の確保：貨物の共同輸配送など輸送効率向上の取組
- ▶ 自動車分担率 → 自動車利用の抑制：公共交通へのモーダルシフト・MM
- ▶ 渋滞損失時間 → 交通円滑化：ボトルネック解消・新規道路整備

# 分析のまとめ

## ▶ モデル構造の推敲

→説明変数及びモデル式の推敲

→特に入力変数については説明力の高い指標の採択が重要

## ▶ 効率性の帰着先（CO<sub>2</sub>集計方法）の検討

→CO<sub>2</sub>排出量の集計は発地ベース？着地ベース？通過地ベース？

→想定する施策によってCO<sub>2</sub>の推計方法が異なる

## ▶ 使用するデータセットの検討

→PT、物流センサス、港湾統計 等

→自動車交通以外への展開

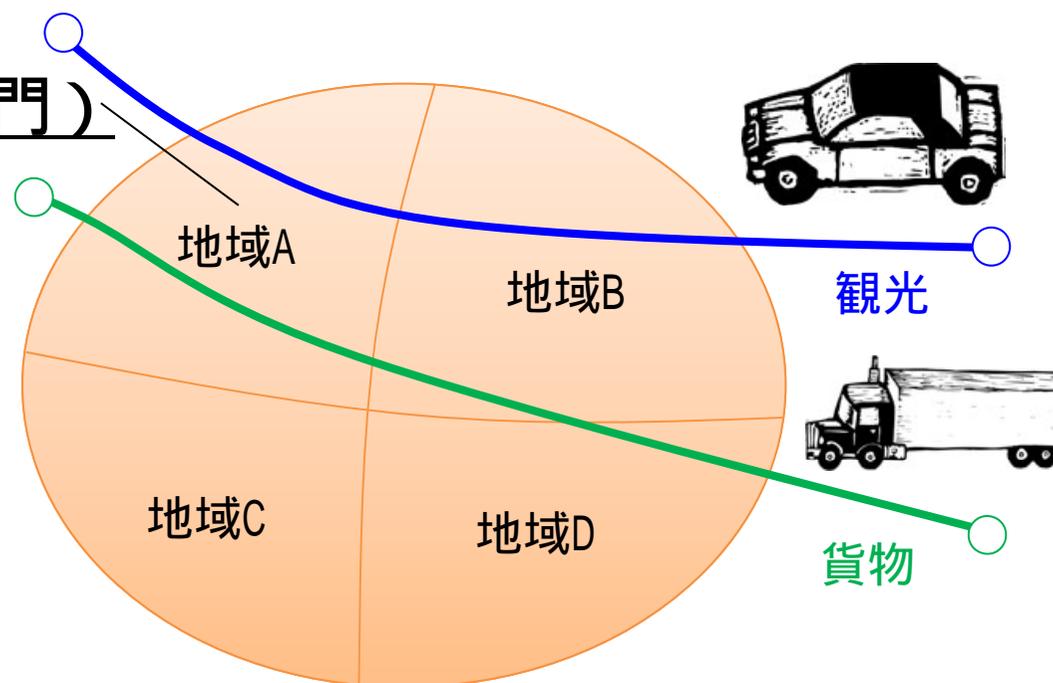
## ▶ 運輸部門のみならず総合的な目標設定・施策検討への適用

# 環境効率性評価手法の拡張性

# 運輸部門CO<sub>2</sub>の排出源

- 運輸部門CO<sub>2</sub>の排出源は地域ではなく移動体  
現在：観光や貨物といった通過交通によるCO<sub>2</sub>排出量も“地域”に帰着させる評価構造

## 地域別CO<sub>2</sub>排出量（運輸部門）

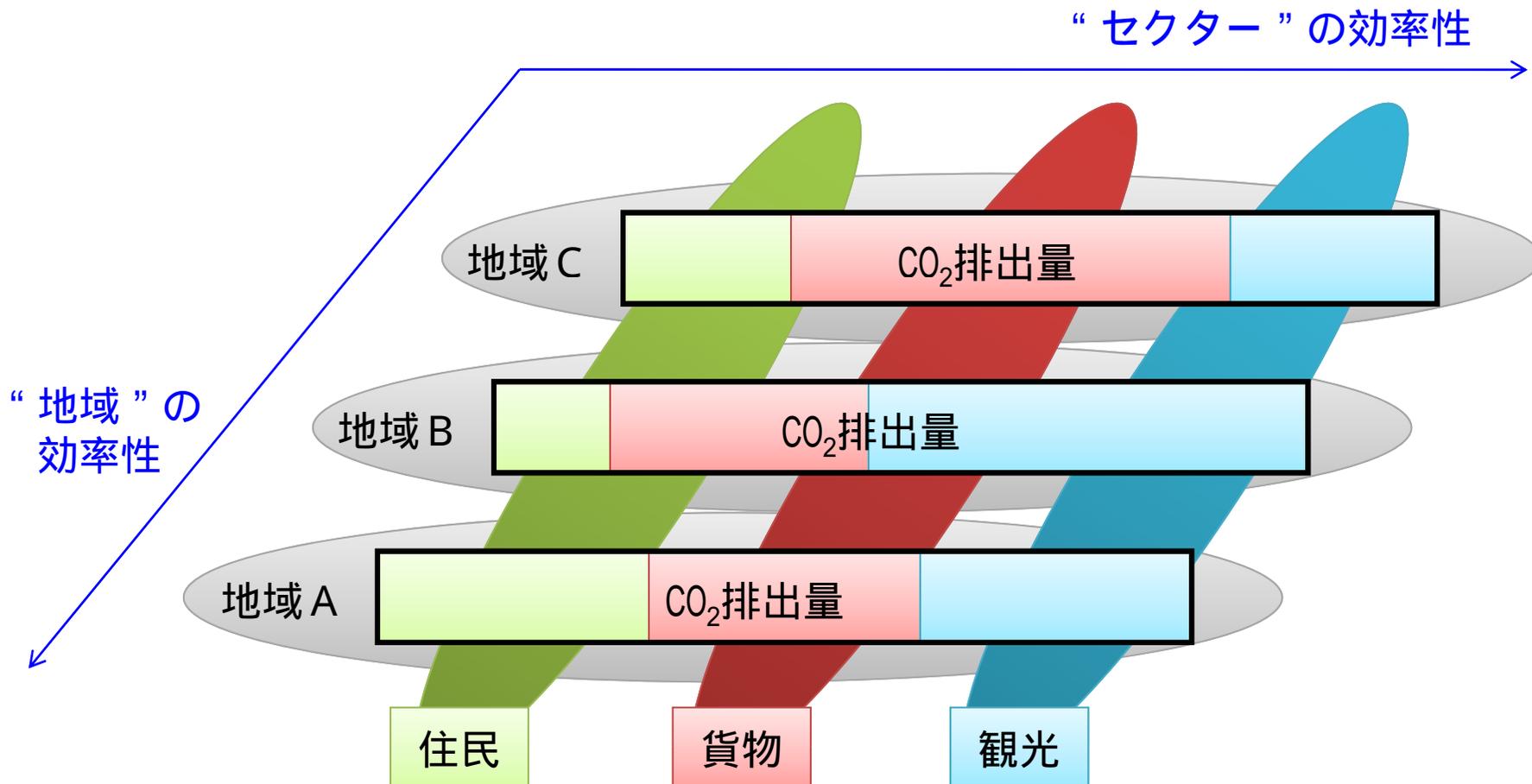


# “地域”への帰着と“セクター”への帰着

- 多様なCO<sub>2</sub>削減施策
  - “地域”に着目した施策
    - ロードプライシングや通行規制
    - 土地利用規制
  - “セクター”に着目した施策
    - 休日分散化政策（観光セクター）
    - 貨物輸送関連政策（物流セクター）

CO<sub>2</sub>排出量が異なるセクターによる行動結果の集積であることを反映した環境効率性の計測方法の開発

# 基本コンセプト



“地域”の効率性に加えて，“セクター”の効率性を提示する  
地域への過剰な帰着（負担）を回避し，セクターごとの政策評価を可能に

## 市民の居住と自動車保有・利用行動に関するアンケート調査

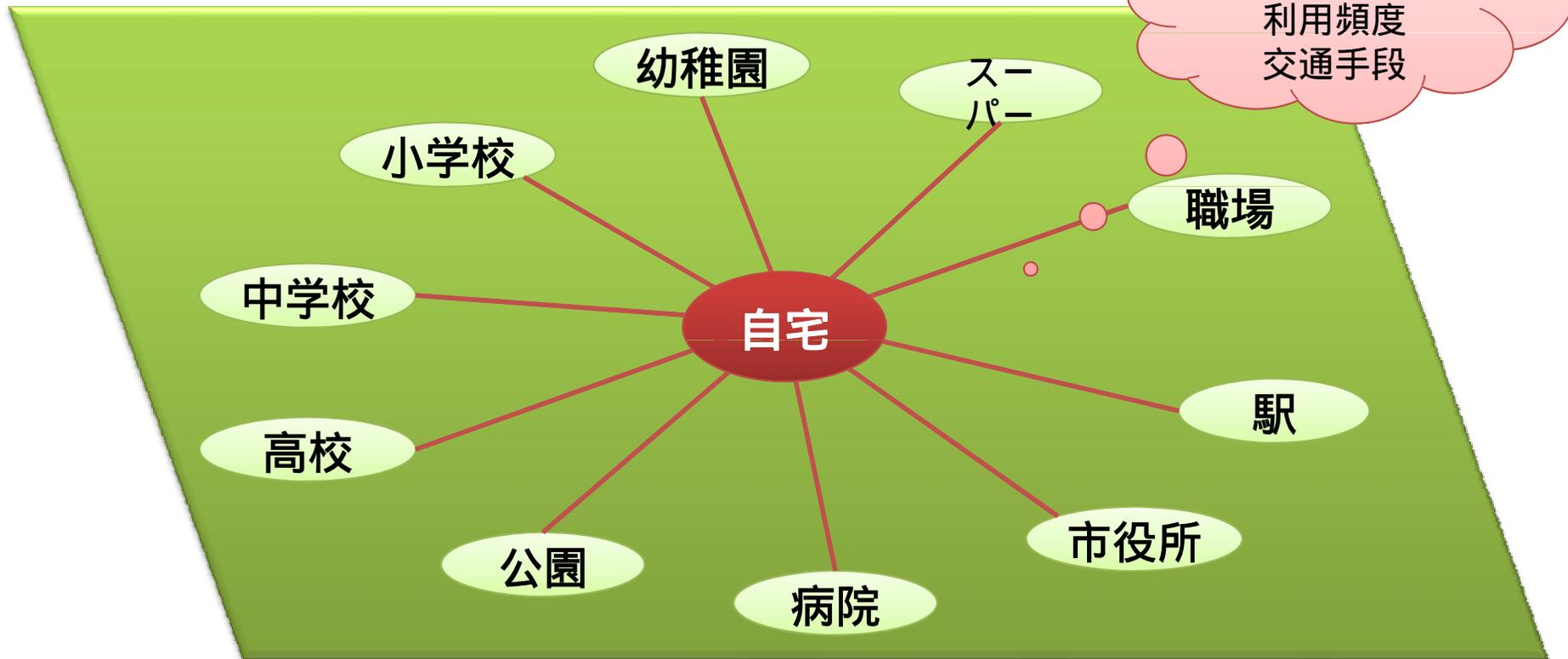
## 調査概要

調査の方法	Web調査
調査地域	政令指定都市（19都市）
調査対象	政令指定都市の居住者・勤務者・通勤者
調査実行時期	2010年4月14日
回答サンプル数	863(人)
質問項目（抜粋）	1 ) 各都市施設への実際の距離・交通手段・頻度 2 ) 各都市施設への最適な距離・交通手段・頻度 3 ) 自動車の保有・利用行動

A

# 住民（居住）セクター

住民（居住）セクターからのCO2排出



$$\left[ \begin{array}{c} \text{各都市施設までの} \\ \text{距離・利用頻度・交通手段} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{交通手段別} \\ \text{CO2排出係数} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{居住セクターから} \\ \text{のCO2排出量} \end{array} \right]$$

(松橋ら(2004)に準じる) (g-CO2/人・日) 23

- コブダグラス型の費用関数を仮定したSFAモデル

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta \cdot \ln(x_i) + \varepsilon_i + \mu_i$$

確率変数（正規分布）  
↓  
確率変数  
（非負の切断正規分布）

セクター	$y_i$	$x_i$
居住 セクター	居住セクターからのCO2排出量（g-CO2/人・日）	<ul style="list-style-type: none"> <li>世帯・個人属性</li> <li>各都市施設までの距離</li> </ul>

$$\text{環境効率性} = \frac{\text{環境負荷要因（施設配置，世帯・個人属性 など）}}{\text{環境負荷量（CO}_2\text{排出量 など）}}$$

[= exp(- $\mu_i$ )]

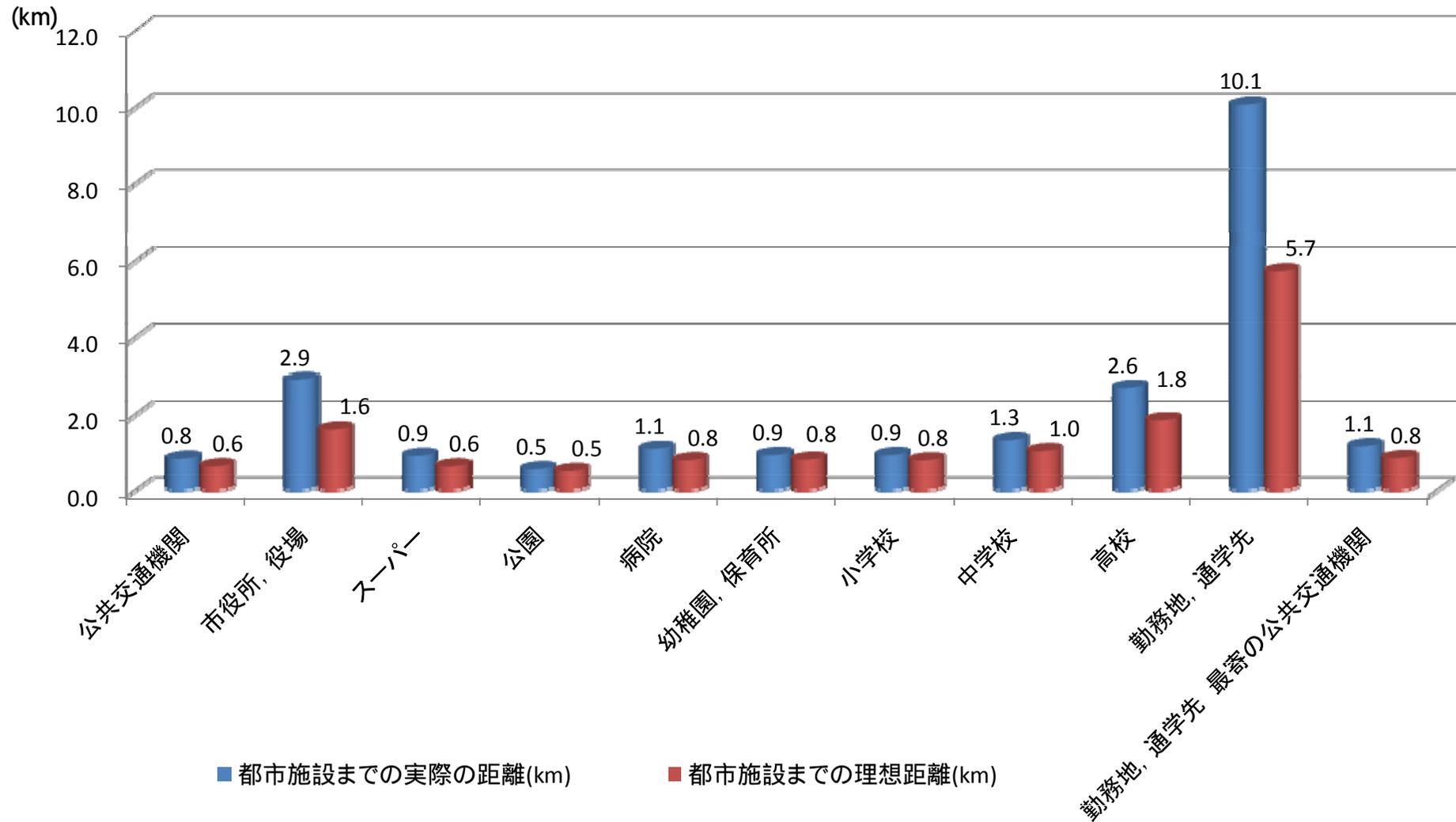
A

## SFA推定結果（通勤・通学のある個人）

変数名	推定値	t値
定数項	4.939	7.370**
<u>個人世帯属性</u>		
女性ダミー	-0.189	-1.836+
ln(年齢)	0.040	0.290
ln(世帯収入)	-0.008	-0.290
ln(世帯人数)	0.049	1.395
<u>施設配置</u>		
ln(最寄り市役所(役場)までの距離)	0.156	2.937**
ln(最寄りスーパーマーケットまでの距離)	0.131	2.185*
ln(最寄り公園までの距離)	-0.010	-0.211
ln(最寄り病院までの距離)	0.112	2.316*
ln(勤務地(通学先)までの距離)	0.349	8.490**
$\chi^2$	1.225	2.693**
$\mu^2 / (\mu^2 + \sigma^2)$	0.571	1.629
LL(C)	-571.54	
LL( )	-518.08	
サンプル数	401	
<u>効率性(平均)</u>		
CO <sub>2</sub> 排出量(平均) [g-CO <sub>2</sub> /人・日]	0.5704	
CO <sub>2</sub> 余剰排出量(平均) [g-CO <sub>2</sub> /人・日]	1110.6	
CO <sub>2</sub> 余剰排出量(平均) [g-CO <sub>2</sub> /人・日]	610.1	

A

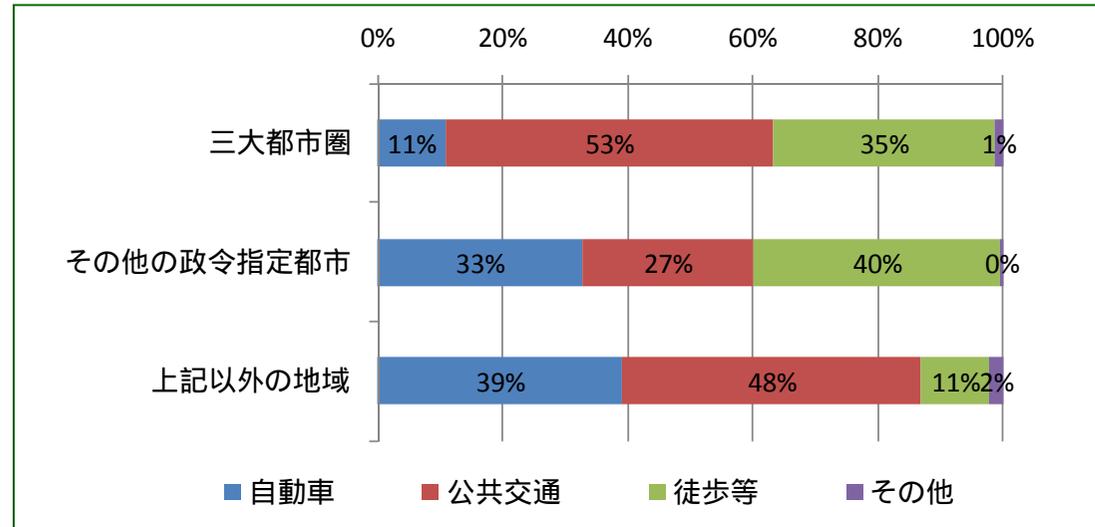
# 各都市施設までの理想距離



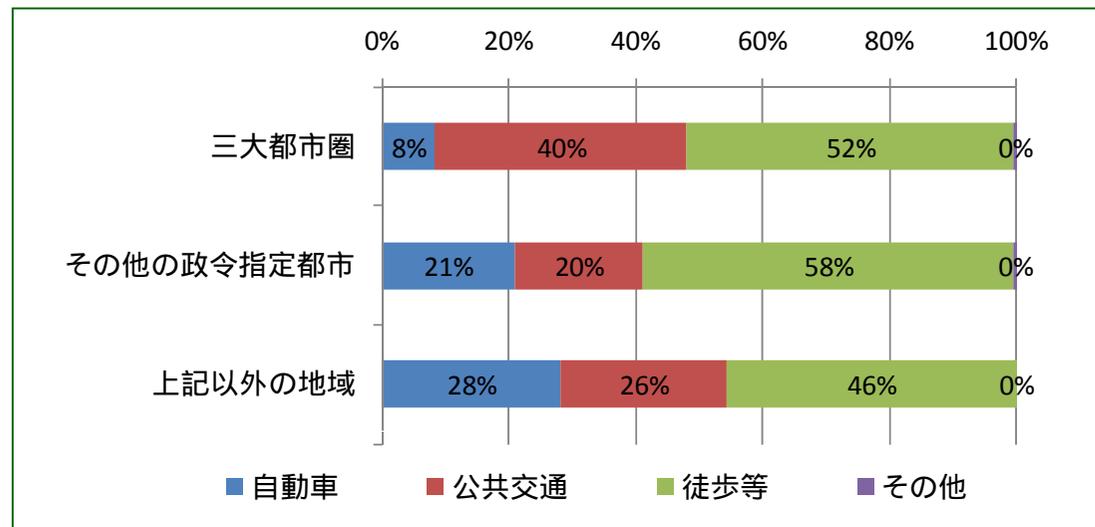
A

# 交通手段分担率（通勤・通学）

現在の交通手段分担率  
（通勤・通学目的）



理想距離下における交通手段分担率（通勤・通学目的）



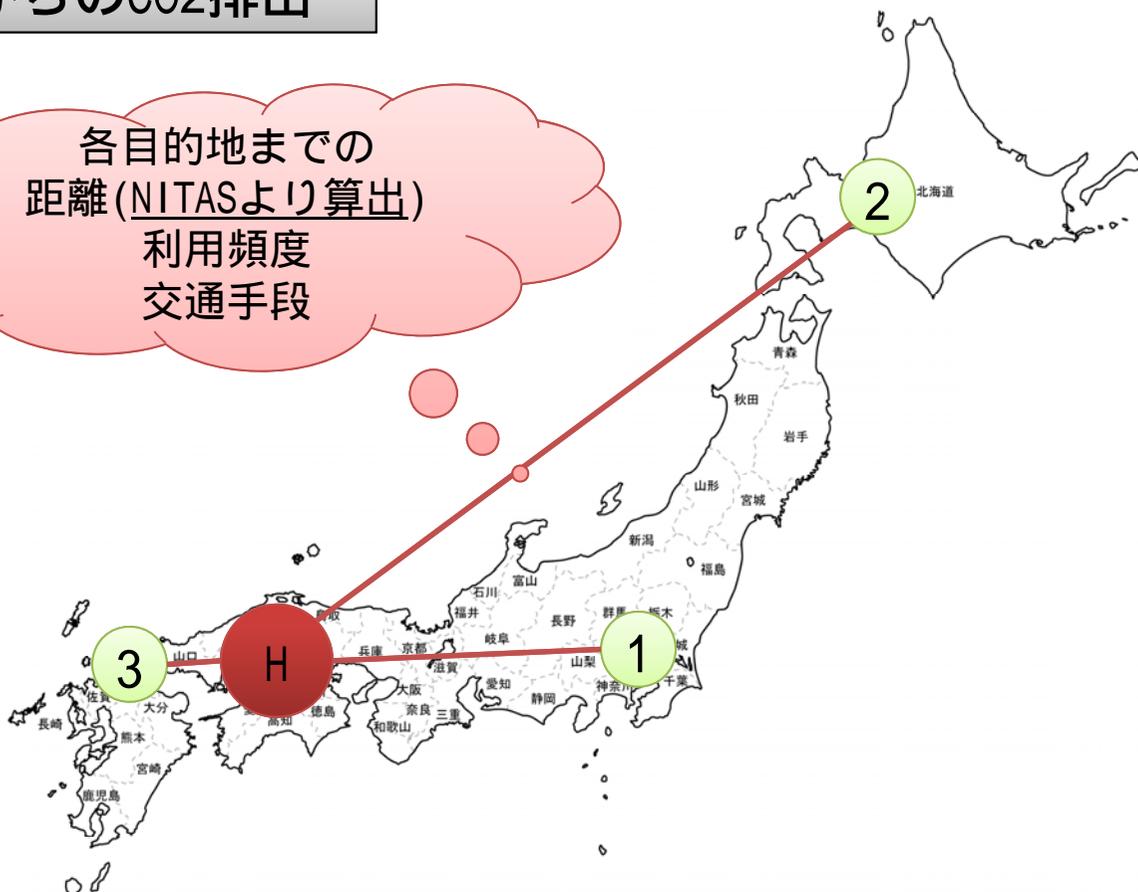
## 宿泊を伴う観光行動の実態調査

### 調査概要

調査の方法	Web調査
調査地域	日本全国
調査対象	2009年一年間の全ての観光行動
調査実行時期	2010年4月6日
回答サンプル数	1,253(人) : 2,041(総観光回数) : 7,619(総観光日数)
質問項目(抜粋)	1) 年間の観光行動内容 2) 観光に関して苦勞したり制約になった点 3) 行動変容可能性(休日分散化)

## 観光セクターからのCO2排出

各目的地までの  
距離 (NITASより算出)  
利用頻度  
交通手段



各観光地までの  
距離・利用頻度・交通手段

×

交通手段別  
CO2排出係数

=

観光セクターから  
のCO2排出量

(松橋ら(2004)に準じる)

(g-CO2/人・キロ) 29

- コブダグラス型の費用関数を仮定したSFAモデル

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta \cdot \ln(x_i) + \varepsilon_i + \mu_i$$

確率変数（正規分布）

確率変数  
（非負の切断正規分布）

セクター	$y_i$	$x_i$
観光	観光セクターからのCO2排出量（CO2/人・キロ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>世帯・個人属性</li> <li>観光形態</li> </ul>

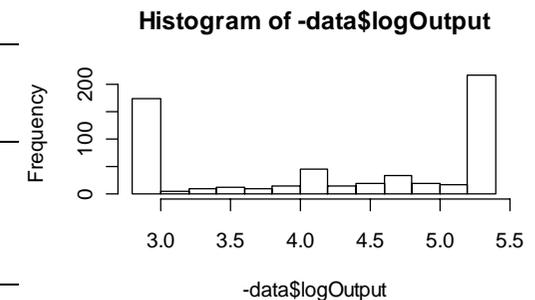
$$\text{環境効率性} = \frac{\text{環境負荷要因（観光形態, 世帯・個人属性 など）}}{\text{環境負荷量（CO}_2\text{排出量 など）}}$$

[=  $\exp(-\mu_i)$ ]

B

# SFA推定結果（国内旅行者のみ対象）

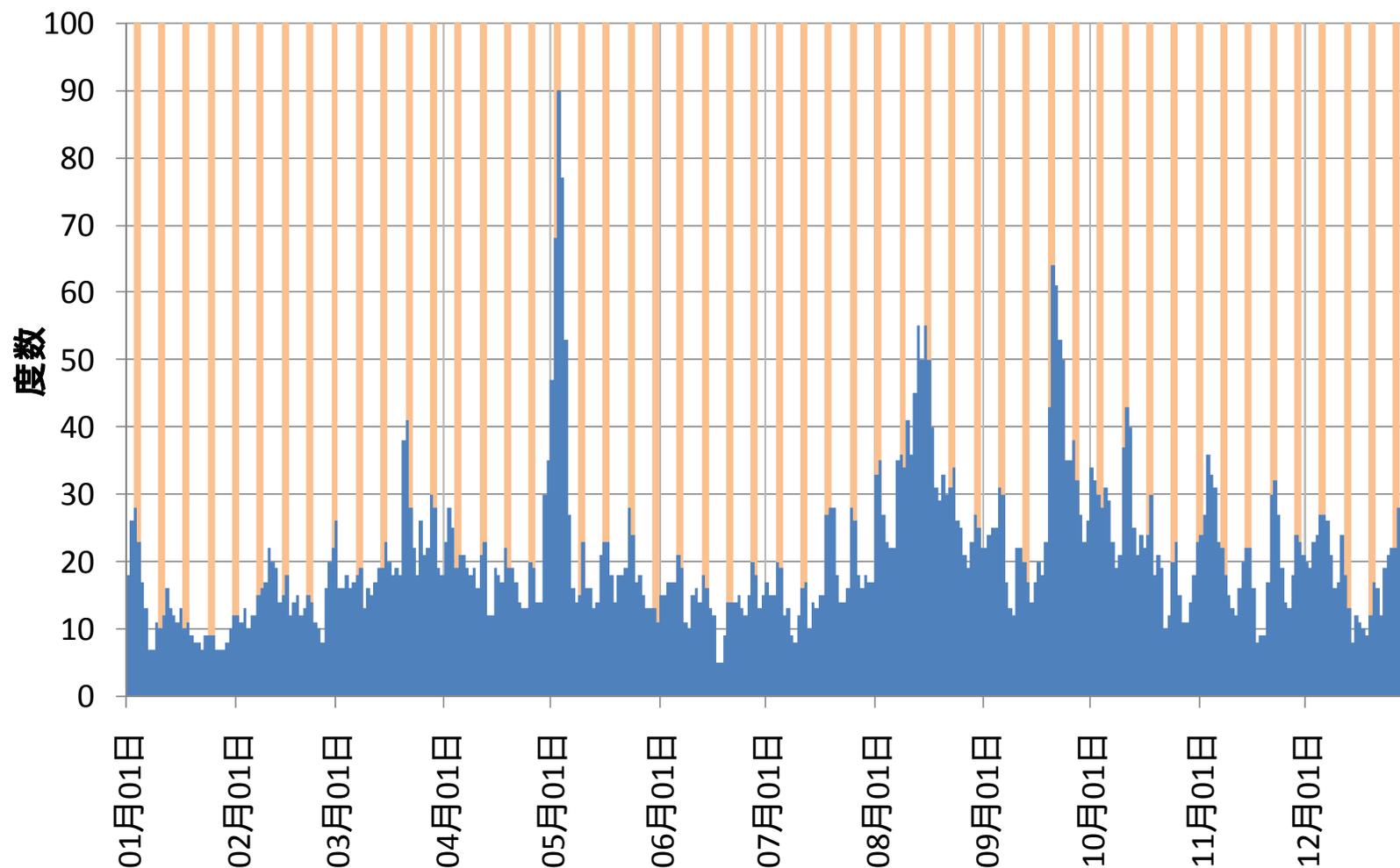
変数名	推定値	t値
定数項	5.959	6.839 **
<b>個人世帯属性</b>		
女性ダミー	0.218	2.951 **
ln(年齢)	-0.045	-0.441
自動車保有ダミー	0.592	6.200 **
ln(世帯人数)	-0.125	-1.607
ln(世帯収入)	0.028	0.478
<b>観光形態</b>		
ln(総観光回数)	0.003	0.045
ln(観光地までの距離（1回あたり平均）)	-0.121	-3.002 **
ln(平均移動費用)	-0.064	-2.775 **
ペット同伴回数 / 総観光回数	0.829	3.826 **
介護者同伴回数 / 総観光回数	0.395	2.025 *
ln(平均旅行人数)	0.252	3.877 **
GWダミー	0.281	2.853 **
SWダミー	0.060	0.533
$\chi^2 / (df)$	0.765	17.794 **
$R^2 / (R^2 + \sigma^2)$	4.E-05	0.005
LL(C)	-821.22	
LL( )	-753.05	
サンプル数	586	
<b>効率性（平均）</b>		
C02排出量（平均） [g-C02/人・km]	103.5	
C02余剰排出量（平均） [g-C02/人・km]	0.463	



分布形の仮定を変更する必要あり？

B

## 観光発生 の 時間分布



ピーク： ゴールデンウィーク，シルバーウィーク，お盆

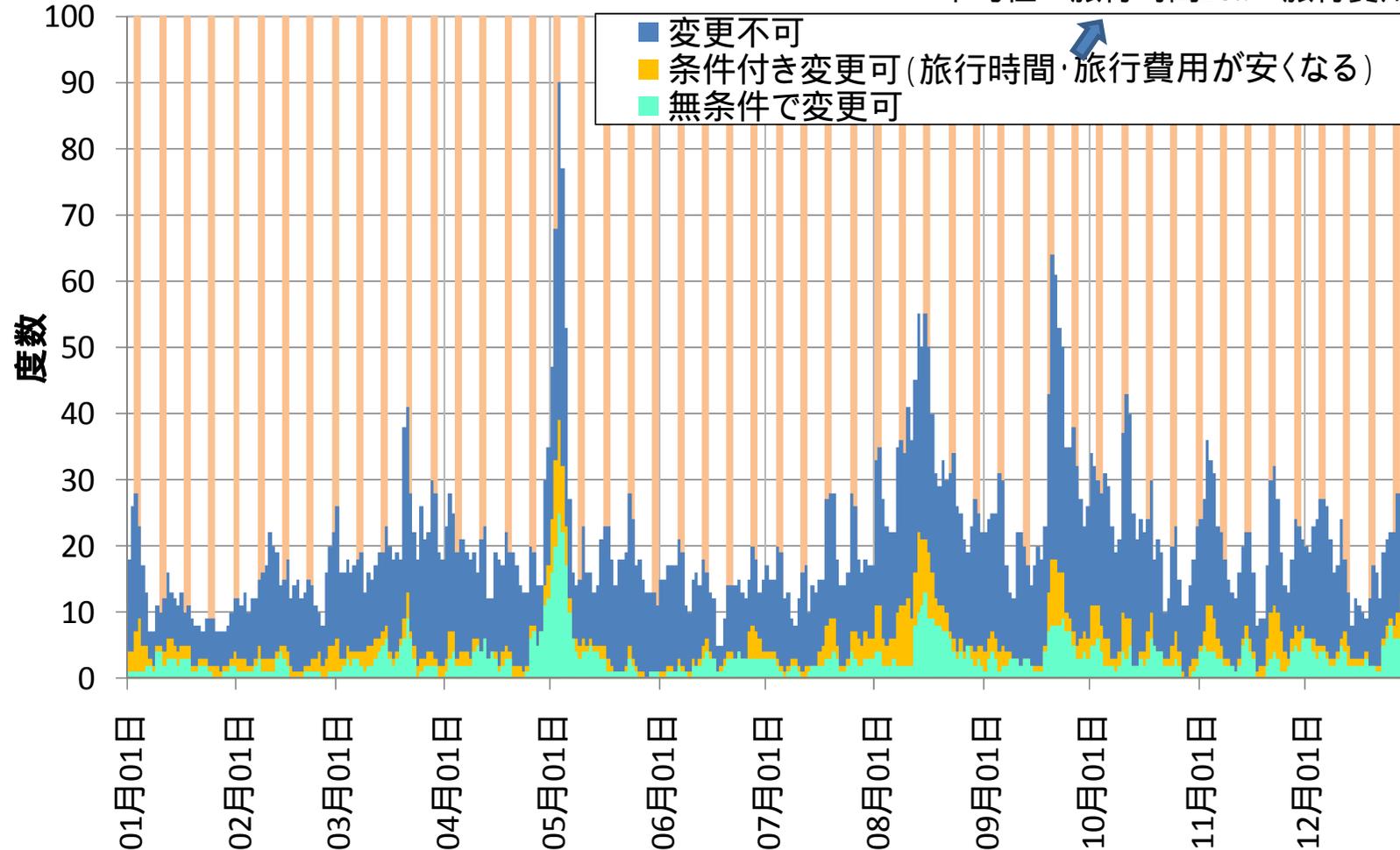
度数の単位は[人・日]

(e.g., 5月3~5日の観光行動が1つ加わると度数は3増える)

B

# 観光発生タイミングの変容可能性

平均値：旅行時間23% 旅行費用31%



ゴールデンウィーク・シルバーウィークなど特定期間に連続した休暇をとる人が集中するため、交通機関や観光地は混雑して料金が高くなり、環境にも悪影響を及ぼしています。

これらの問題を緩和するための方法として、休みを分散して取る方法が考えられます。

**仮に、今回の旅行期間と同様の期間の休みをあなた（及び旅行同伴者）の望む時期にいつでも取得できる場合、総旅行時間がどの程度短くなれば、また、総旅行費用がどの程度安くなれば、今回の旅行の時期を変更していたと思われますか。以下の中から1つお選びください。**

B

# 観光集中の時空間分布

少ない

多い

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
北海道													540
東北													474
関東													1278
中部・北陸													1441
関西													774
中国・四国													366
九州・沖縄													641
複数都道府県													334
国内													5848
海外													1771
計													7619

北海道, 海外 : シルバーウィークにピーク  
 その他 : ゴールデンウィークにピーク

(人・日)

度数の単位は[人・日]  
 (e.g., 5月3~5日の観光行動が1つ加わると度数は3増える)

34

# 得られた知見（居住&観光セクター）

- 環境効率性  
居住セクター < 観光セクター
- 居住セクターにおける環境負荷要因
  - 負荷大：勤務地（通学先）までの距離が大きな環境負荷要因
  - 負荷大：スーパー・市役所・病院までの距離も関連
- 観光セクターにおける環境負荷要因
  - 負荷大：自動車保有の有無が主要な要因
  - 観光回数は、単位距離当たりCO<sub>2</sub>排出量に影響しない
  - 負荷小：遠い観光地ほど単位距離当たりCO<sub>2</sub>排出量は少ない
  - 負荷小：移動費用とCO<sub>2</sub>排出量の間には負の相関あり
  - 負荷大：ペット同伴・要介護者同伴の場合、CO<sub>2</sub>排出量増加
  - 負荷大：GWの旅行は、単位距離当たりのCO<sub>2</sub>排出量を増加させる

# 今後の課題と方向性（居住&観光セクター）

- 他のデータソースとの整合性・融合可能性
  - 本調査データ
    - 居住セクター（通勤・通学者）の運輸部門CO<sub>2</sub>排出量：1111[g-CO<sub>2</sub>/人・日]
    - 観光セクター（国内旅行者）の運輸部門CO<sub>2</sub>排出量：498[g-CO<sub>2</sub>/人・日]
  - 他のデータ（出典）全国地球温暖化防止活動推進センター）
    - 家庭からの二酸化炭素排出量：5890 [g-CO<sub>2</sub>/人・日]  
（うちガソリンからの二酸化炭素排出量：1602[g CO<sub>2</sub>/人・日]）
- セクター間の関連性 / 地域とセクターの関連性
  - 方法論的検討：階層的・交差分類的な環境効率性の計算
- 自動車保有・利用行動の考慮方法の検討
  - 自動車保有・利用を認めた上での環境効率性の算出  
or 自動車保有・利用を認めない環境効率性の算出

# 今後の課題と方向性（セクター別）

- 居住セクター
  - 居住セクターから排出される他のCO2排出源の扱い
  - 通勤・通学者以外の環境効率性の計算
  - 三大都市圏と地方都市の差の考慮
- 観光セクター
  - 観光発生のタイミングを考慮した環境効率性の評価
  - 誤差分布（SFA）の仮定の見直し
    - 他のアプローチで効率性を議論する必要あり？
  - 海外観光の考慮

# 付録

# 設定（居住セクター）

## 各都市施設の利用頻度

カテゴリ（調査票）	1日当たり利用回数
ほぼ毎日	0.8
週3-4回	0.5
週1-2回	0.2
月1回	0.033
それ以下	0.01

## 交通手段別CO<sub>2</sub>排出係数 （松橋ら，2004）

カテゴリ（調査票）	排出係数 (g-CO <sub>2</sub> /人km)
自家用車（運転）	190
自家用車（送迎）	190
バス	58
路面電車 / LRT	19
地下鉄	19
モノレール	19
新交通システム	19
自動二輪車	92
自転車	0
徒歩	0
航空機	109

# 一般情報

家庭からの二酸化炭素排出量(1人あたり) :

=5890 [g-CO<sub>2</sub>/人・日]

=2150 [kg-CO<sub>2</sub>/人・年]

うちガソリンからの二酸化炭素排出量(27.2%) :

=1602 [g-CO<sub>2</sub>/人・日]

= 585 [kg-CO<sub>2</sub>/人・年]

2007年 ( 出典 : 温室効果ガスイベントトリオフィス )