

Optimal pricing and investment in a multi-modal city —Introducing a macroscopic network design problem based on the MFD.

Loder, A., Bliemer, M. C., & Axhausen, K. W. (2022).
Transportation Research Part A: Policy and Practice, 156, 113-132.

2022年8月6日

修士2年 増田 慧樹

概要

- 交通システムの性能向上は、多くの設計変数が相互に作用するため、技術者や政策立案者にとって課題である。
- 本論文では、**3D-MFD-Network Design Problem**を提案する。
- 3D-MFD-NDPは、**マルチモーダル交通システム**における政策の方向性を特定するためのツールで、道路と公共交通サービスの供給が自動車と公共交通のコストと相互作用し、道路交通システム全体の性能を決定する。
- 3D-MFD-NDPは、これらの効果を**ネットワークレベルで集約してモデル化し、リンクベースの方策ではない**。
- 目的関数=総移動時間最小化、設計変数=自動車とバスのコスト、バス運行間隔、バス専用レーン割合、道路NWの長さ
- 3D-MFD-NDPは、**均衡制約付き数理計画問題（MPEC）として定式化**できるのが利点で、詳細な計算を要するシミュレーションベース手法の代わりに、高速なclosed-formの解を得ることができる。
- 3D-MFD-NPをZurich都市圏で、2つのケースに適用する。
 1. 現在のNWパフォーマンスが料金設定と道路開発によりどれほど改善できるか調べた。道路整備のための信頼性の高いコスト情報は取得できないにも関わらず、自動車使用のコストを増加させた場合、かなりの移動時間短縮が可能であることを示した。
 2. 人口が20%増加するケースに適用した結果、システムは人口増加に対応できるが、システムコストを多くの利用者で分担することで、1トリップ当りコストが減少し、価格による効果が減殺される。

Introduction

- 交通混雑の問題
 - 自動車交通をバスに置換すればフローは改善されるが、アクセス・イグレス時間や待ち時間による旅行時間の増加を考えると、全てをバスにするのは最適解でない
 - バスと車の比率はどれくらいがいいか？
システムコストをカバーし最適な手段選択を促すにはどのようにプライシングすればいいか？
 - これは、混雑外部性と移動手段の共有 (bus, ride-sharing) に対する個人の選好とのトレードオフ
 - 4つのstrategic, tacticalな意思決定の側面がある
 - Road Network Design Problem (RNDP) … NWサイズとデザイン
 - Bus Network Design Problem …バスNWのデザインとオペレーション
 - Dedicated lanes
大規模輸送交通への専用レーンの割り当て
複数交通手段の組み合わせや相互作用を扱った研究は少ない
 - Pricing … 運賃, ロードプライシング, 自動車税, 燃料税

Introduction

- 4つの要素を全て考慮する必要があるが、いくつかの要素の考慮や仮想NWへの適用に止まる（計算規模の問題）
- MFDは、複数交通手段のNWトポロジーと平均旅行時間を一貫して関連づけるツールになる
- MFDの複数交通手段（バスと自動車）への拡張として3D-MFDがある
 - multimodal pricing, バス専用レーンの割り当て, その2者の組み合わせに適用
 - NWトポロジー変化に対応する3D-MFDの関数形を見つけるのが難しいので, NWを変化させるたびにsimulationを回して3D-MFDを描画するsimulation-basedな手法が主
 - この研究では最近発見された**3D-MFDの関数形を使う**
 - accumulation（車両存在台数）とNWトポロジーから, 各モードの速度をシミュレーション無しで算出できる

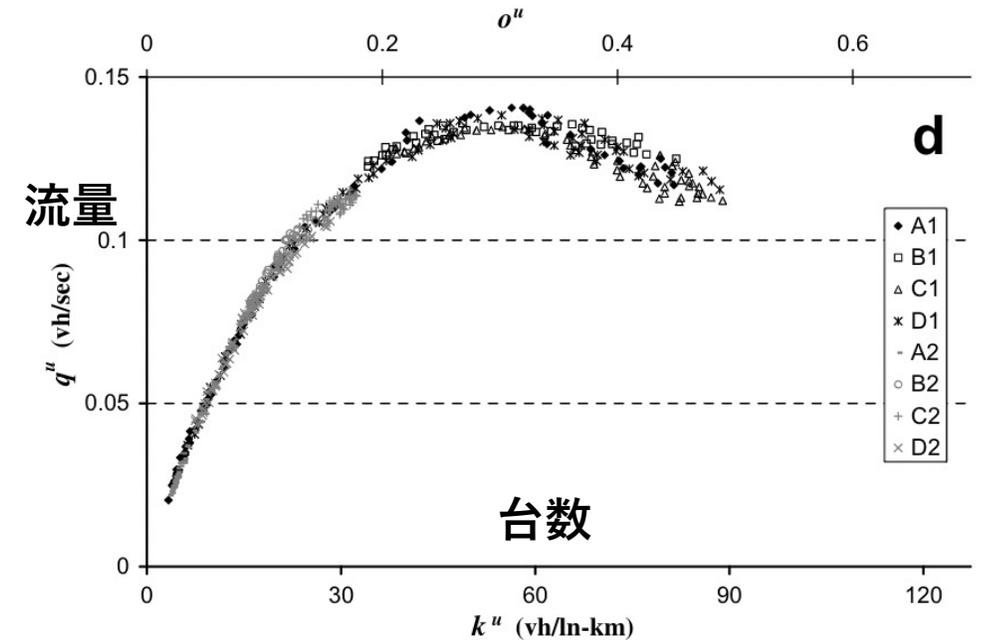
(補足) 3D-MFDについて

Macroscopic Fundamental Diagram (MFD):

自動車交通の速度や密度や流量について集計的・巨視的な関係を表す。

Daganzo (2007)やGeroliminis&Daganzo(2007)では、以下の3つの巨視的変数の関係を明らかにした。

- **Accumulation (veh)**
 - = 車両存在台数 (the number of vehicles in the network)
 - = the product of density and network length
- **Production (veh-km/h)**
 - = VKT (Vehicle kilometers traveled is the total kilometers traveled by vehicles during a given period of time.)
 - = the product of average flow and network length
- **Performance/Output/trip completion rate (veh/h)**
 - = the rate at which vehicles leave a network



横浜のMFD (Accumulation-Production)

Geroliminis & Daganzo (2008). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>
TU Delft OCW <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-11-Macroscopic-fundamental-diagram.pdf>

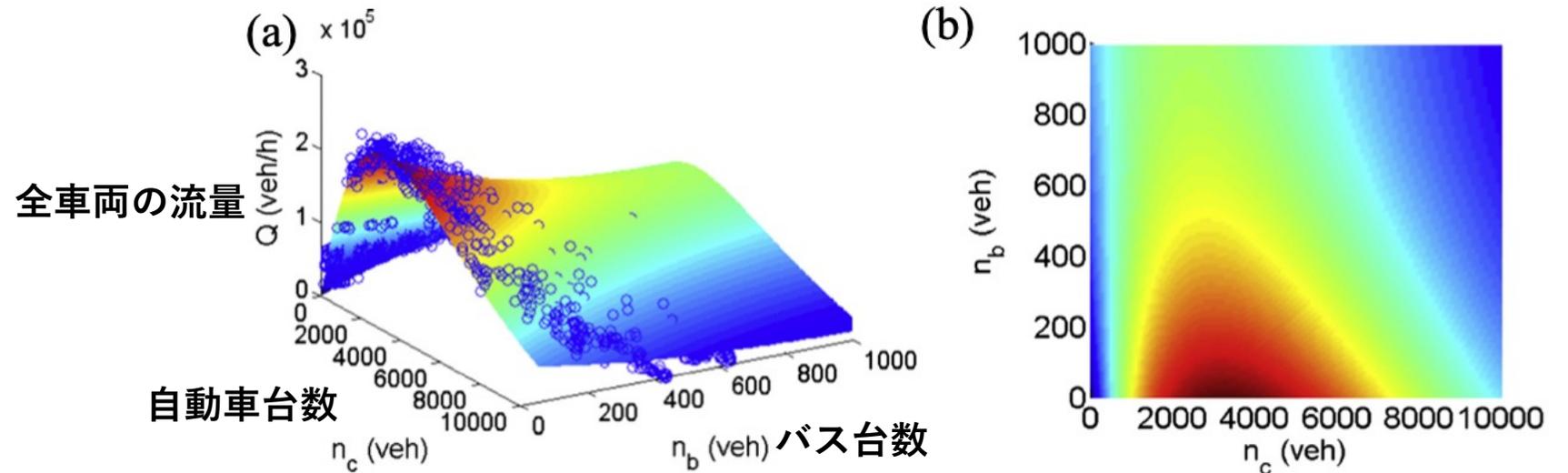
(補足) 3D-MFDについて

Three-Dimensional Macroscopic Fundamental Diagram (3D-MFD):

バイモーダルネットワークの速度や密度や流量について集計的・巨視的な関係を表す。

渋滞のダイナミクスにおける2つのモードの相互作用を考慮できる。

例えば、バスの台数が増えるとその分道路が占有されるので、自動車交通の流量が低下するという関係を記述できる



サンフランシスコにおける車両ベースの3D-vMFD (Geroliminis et al., 2014)

Introduction

- 3D-MFDを使ったNetwork Design Problem (3D-MFD-NDP) を提案し, 均衡制約付き数理計画問題 (MPEC; Mathematical Problem with Equilibrium Constraints)として定式化
 - MFDを使えば, 必要なら交通を細かくモデル化しその他は抽象化できる
- 3D-MFD-NDPは, 長期的な交通システムの分析・計画・設計において, 大規模な都市スケールでマルチモーダルな交通戦略を分析するための新しい方法論である.

(補足) MPECについて

均衡制約付き数理計画問題 (MPEC; Mathematical Problem with Equilibrium Constraints) :

制約条件の中に相補性条件を含む数理計画問題.

$x \geq 0, y \geq 0, xy = 0$ の形の制約条件. Wardropの第1原則もこれ

例) 二段階最適化問題 (ネットワークデザイン, 土地利用交通モデルなど)

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f_1(x, y) && \text{上位問題} \\ &\text{subject to} && (x, y) \in X \\ &&& \text{minimize} && f_2(x, y) && \text{下位問題} \\ &&& \text{subject to} && g_i(x, y) \leq 0, && (i = 1, \dots, m) \\ &&& && h_j(x, y) = 0, && (j = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f_1(x, y) \\ &\text{subject to} && (x, y) \in X \\ &&& \nabla f_2(x, y) + \sum_{i=1}^m \mu_i \nabla g_i(x, y) + \sum_{j=1}^n \lambda_j \nabla h_j(x, y) = 0 \\ &&& \mu_i \geq 0, \quad g_i(x, y) \leq 0, \quad \mu_i g_i(x, y) = 0, \quad (i = 1, \dots, m) \\ &&& h_j(x, y) = 0, \quad (j = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

相補性条件が現れる

下位問題をKKT条件で置き換える

(補足) MPECについて

- 例えば、以下のようなMPECを考えてみると、実行可能領域は下図のような感じ。

$$\begin{aligned} \text{目的関数: } & x^2 + y^2 \rightarrow \text{最小} \\ \text{制約条件: } & 2x + 3y - 6 \geq 0, x \geq 0 \\ & x(2x + 3y - 6) = 0 \\ & y \geq 0 \end{aligned}$$

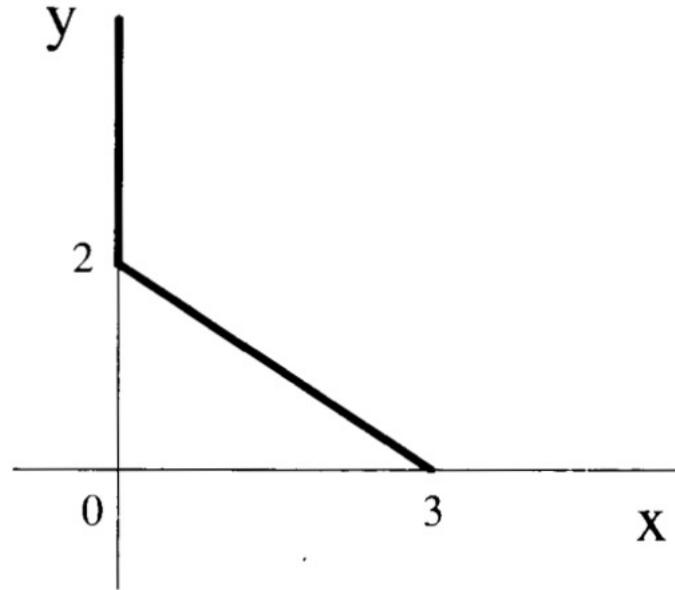


図 4: 問題 (15) の実行可能領域

実行可能領域は凸でないし折れ曲がっているので、通常为非線形最適化の手法を用いても、最適解を得られる保証がない → 難しさ

https://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/bul/Vol.41_06_331.pdf

Introduction

- 3D-MFD-NDPは二段階最適化として定式化できる
 - 上位問題：マルチモーダル交通のアセット（交通インフラ・公共交通車両）， pricingを決定
 - 下位問題：Wardrop均衡に基づく静的交通量配分
 - MPECとして定式化． 均衡条件をmixed complementarity problem (MCP)でかく．
 - インフラ投資のモード間相互作用， pricing， 交通行動を合わせて分析する**単一の最適化問題**になる
 - Zurich, 朝の通勤時間帯が対象（交通システムにとって最もきつい時間帯）
 - pricingの決定変数は公共交通機関の運賃， 自動車税， 燃料税
 - インフラ投資の決定変数はNWの道路長， バス運行間隔， バス専用レーンの割合
1. 政府補助金が0として現在の状況を改善する戦略を調べる
 - (i) 道路投資なし， バス投資あり
 - (ii) 道路投資あり， バス投資あり
 - (iii) 道路投資あり， バス投資あり， 駐車容量を30%減らす
 2. 人口が20%増加した場合にシステムが適応できるか， 最適なpricingはどのようなものか調べる

目次

1. Introduction
2. Model (3D-MFD-NDPの定式化)
3. Model implementation (モデルの設定方法)
4. Policy analysis (Zurichでの政策分析)
5. Conclusions

2. Model

- 既存の交通システムの改変なので、既存のNWをインプットとして車線数を変更したり公共交通の運行間隔を変更する（NW構造やバスルートを変えることはしない）
- 交通システムのモード $m \in \{\text{bus}, \text{car}\}$
- 住民が保有するmobility tools $t \in \mathcal{T} = \{\text{car}, \text{abo}, \text{both}\}$.
= 住民はcarか、公共交通のシーズンチケット（abo※）か、その両方を保有する.

※ドイツ語のabonnement（会費・料金）の略

2.1 入力変数を定義

2.2 決定変数と目的関数を定義

2.3 均衡制約

2.4 容量制約

2.5 経済制約

2.6 mobility tool保有の制約

2.7 3D-MFDを定式化

2.8 Practical limitations

2.9 Policy limitations

2.1 Input variables

- 入力変数は上棒付きで表す. (上棒がついていれば外生変数ということ)

$\bar{\pi}_t^{\text{fix}}$: 現在の固定コスト (自動車税, 公共交通割引カード)

$\bar{\pi}_m^{\text{var}}$: 現在の距離あたり変動コスト (燃料税, キロ当り運賃)

\bar{c}^{road} : 道路インフラのキロ当りコスト

\bar{c}^{bus} : バスの1台当りコスト

\bar{S} : 現在の補助金

- NW全体を均質な小NWに分割 (全体NW内の異質性を表現可能).
ゾーン k は以下で特徴付けられる.

\bar{L}_k : 道路インフラの総延長

\bar{H}_k : バスの運行間隔

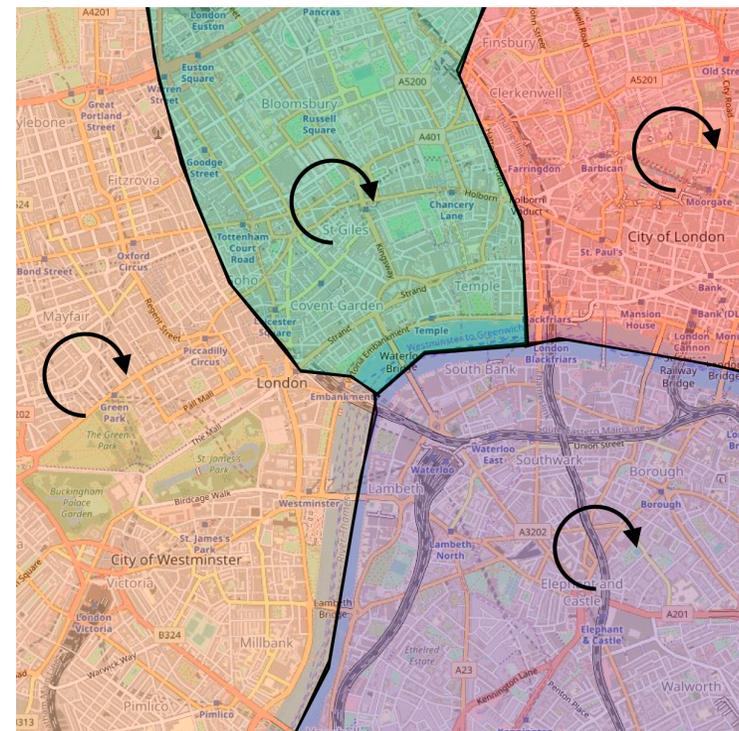
\bar{P}_k : 駐車スポットの総数

$\bar{\eta}_k$: バス専用レーンのシェア

\bar{B}_k : バスインフラの総延長

$\bar{V}_{c,\text{bus}}$: バスの速度

\bar{Z}_k : バスの総容量



(a) Regional network

2.1 Input variables

- 交通需要

\bar{n}_{ij} : ゾーン*i*から*j*へのトリップ数

\bar{Q}_{ijt} : ゾーン*i*から*j*へのトリップのツール*t*のシェア

- トリップについては, Regional pathの考え方を採用
(経路選択=逐次ゾーン選択とみなす)

→あるODペアに対するゾーン*k*のトリップ長の分布を表現

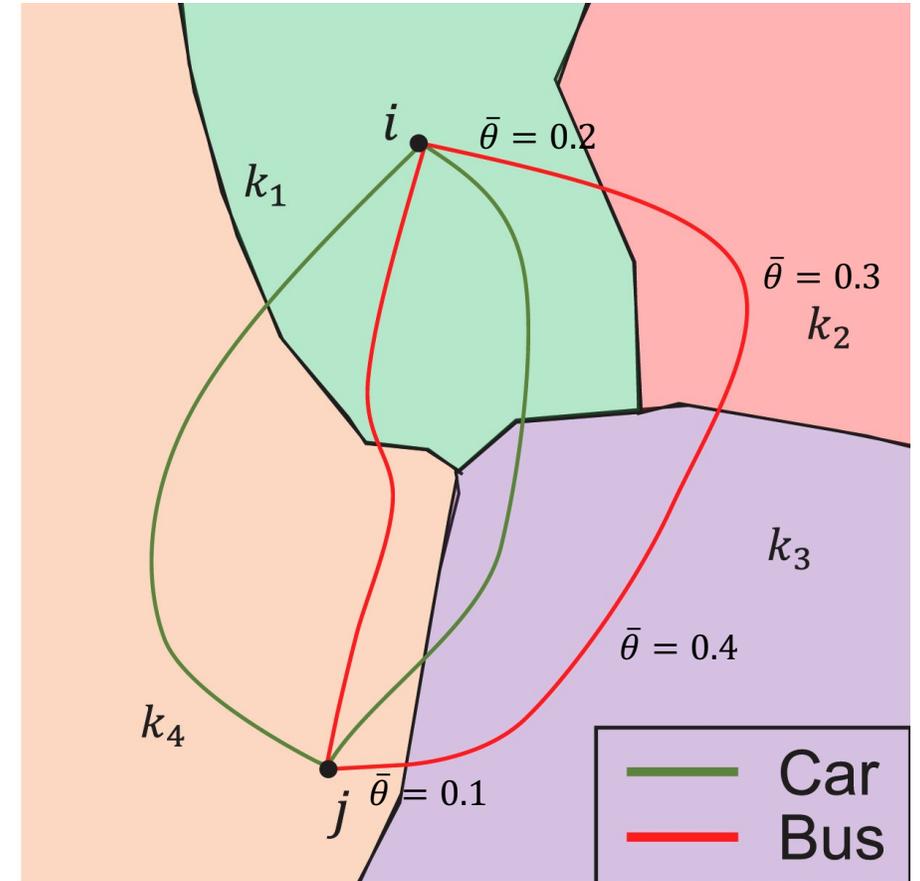
\bar{d}_{ijmr} : 経路*r* (ゾーン*i* → *j*) のモード別平均トリップ長

※ 緑や赤の線の長さ

$\bar{\theta}_{ijkmr}$: 経路*r* (ゾーン*i* → *j*) のモード別トリップ長における
ゾーン*k*の割合

※ 1本の線について各ゾーンを通る部分の割合

※ この線は実際の道路には対応していない



(b) Regional paths

2.2 Design Variables and objective function

- 決定（設計）変数
 - (i) L_k : ゾーン k のネットワーク長
 - (ii) η_k : ゾーン k のバス専用レーンのシェア
 - (iii) H_k : ゾーン k のバス運行間隔
 - (iv) π_t^{fix} : モビリティツール t の固定コスト（保有コスト）
 - (v) π_m^{var} : モード m の変動コスト（利用コスト）
- 上位問題の目的関数：総旅行時間

$$y = \sum_{ijmr} \underbrace{N_{ijmr}}_{\substack{\text{旅行時間} \\ \text{待ち時間 (バス利用者のみ)}}} \left(T_{ijmr} + \frac{H_i}{2} \delta_m^{\text{bus}} \right)$$

ゾーン $i \rightarrow j$, モード m ,
経路 r の旅行者数

2.3 Equilibrium constraints

- この論文では下位問題に静的な配分 (SUE) を使う \leftrightarrow 繰り返しsimulationを用いる方法
 - 長期的な政策の分析に使うのでOK. モデルをシンプルにできる.
 - 旅行者は知覚コスト \check{C}_{ijmr} が最小のモード m , 経路 r を選ぶ.

$$= i \rightarrow j \text{の最小経路コスト } M_{ij} \equiv \min_{m,r} \check{C}_{ijmr}$$

相補性条件により表現

$$\check{C}_{ijmr} - M_{ij} \geq 0 \quad \perp \quad N_{ijmr} \geq 0$$

相補性を表す. $\check{C}_{ijmr} - M_{ij} \geq 0, N_{ijmr} \geq 0, (\check{C}_{ijmr} - M_{ij})N_{ijmr} = 0$ と同じ意味



- 経路コスト最小 ($\check{C}_{ijmr} - M_{ij} = 0$) のときのみ, 旅行人数が正 ($N_{ijmr} > 0$)
- 経路コスト最小でない ($\check{C}_{ijmr} - M_{ij} > 0$) とき, $N_{ijmr} = 0$, つまり旅行者ゼロ

2.3 Equilibrium constraints

知覚コスト $\check{C}_{ijmr} = C_{ijmr} + \frac{1}{\mu^R} \log(N_{ijmr})$

↑
実コスト
スケールパラメータ

MNL型. 経路とモードに重複があるので本来はNLやCNLで書くべきだが, regional pathのデータがなく推定できないので, MNLでやる.

実コスト $C_{ij,car,r} = T_{ij,car,r} + \rho_i^C + \rho_j^P$

↑
自動車保有 駐車場
乗車時間

実コスト $C_{ij,bus,r} = T_{ij,bus,r} + \frac{H_i}{2} + \rho_i^B + \rho_i^T + \bar{\varphi}_{ij}$

↑
待ち時間 容量 シーズン チケット 選択肢固有定数

ρ : 潜在価格 (shadow prices).
利用にかかるお金は2.6で別途考える.

乗車時間 $T_{ijmr} = \sum_k \bar{\theta}_{ijkmr} \frac{\bar{d}_{ijmr}}{V_{km}}$

↑
経路rのうち
ゾーンkの割合

↑
経路rの平均トリップ長
ゾーンkの速度

→ ゾーンごとの平均旅行時間の和

旅行速度 V_{km} : 3D-MFDから求める

2.3 Equilibrium constraints

- 3D-MFDの形はNWの特徴・トポロジーによって変わる
 - NDPで設計変数を変えると, 3D-MFDの形も変わり, 旅行速度や交通行動に影響する
 - それらを変数とする関数で近似

$$V_{km} = 3DMFD_{km}(A_{k,car}, A_{k,bus}, L_k, B_k, \eta_k)$$

ゾーン k , モード m の速度 accumulation = 車両存在台数 NW 総延長 バスNW 総延長 バス専用レーン割合

- しかし, accumulation A をEdie's definitionを使って求めることはできない.
 - ← 1台1台の挙動とゾーンのaccumulationを関連付けられないため
 - 以下のように近似

$$A_{k,car} = \sum_{ijr} \bar{\theta}_{ijk,car,r} N_{ij,car,r}$$

経路 r のうちゾーン k の割合 経路 r を利用する総人数



経路に渡って旅行者が均一に分布しているとして, 全OD・全経路についてゾーン k にいる人数を集計

2.3 Equilibrium constraints

- バスのaccumulation

$$A_{k,\text{bus}} = \bar{z}_k \frac{2\bar{B}_k}{H_k} \frac{3\bar{\alpha}_k - \bar{\alpha}_k^2}{1 + \bar{\alpha}_k^2} / \bar{V}_{c,\text{bus}}$$

- $\bar{\alpha}$ ($0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$): NWトポロジーを表す.
0ならハブ&スポーク型に近く, 1ならグリッド型に近い
- \bar{z}_k : バス路線どうしの重なりを表す
- 車のaccumulationに依存しない → バスは自由流/時刻表通りを仮定

- フロー保存則

$$\underbrace{\bar{n}_{ij}}_{\text{総需要}} - \sum_{mr} \underbrace{N_{ijmr}}_{\text{フローの総数}} = 0 \quad \perp \quad \underbrace{M_{ij}}_{\text{最小経路コスト}} \geq 0$$

- 3D-MFD-NDPをRegional pathによってモデル化したので, リンクベース配分のように各ノードのinflow, outflowを明示的にモデル化する必要がないのが重要な点

2.4 Physical system (capacity) constraints

- 到着する自動車数は、到着地の駐車場容量を超えない

$$\bar{P}_j - \sum_{ir} N_{ij,car,r} \geq 0 \quad \perp \quad \rho_j^P \geq 0 \quad \bar{P}_j - \sum_{ir} N_{ij,car,r} \geq 0, \rho_j^P \geq 0, (\bar{P}_j - \sum_{ir} N_{ij,car,r})\rho_j^P = 0 \quad \text{と同じ意味}$$

駐車場容量 j に到着する総自動車数

もし駐車需要が容量を超えると、正の潜在価格により到着台数は駐車容量内に制限される

- 出発する自動車（バス）のトリップ数は、出発地の自動車数（バスチケット数）を超えない

$$\sum_j (Q_{ij,car} + Q_{ij,both}) \bar{n}_{ij} - \sum_{jr} N_{ij,car,r} \geq 0 \quad \perp \quad \rho_i^C \geq 0$$

$\sum_j (Q_{ij,car} + Q_{ij,both}) \bar{n}_{ij}$ 車の保有率

$\sum_{jr} N_{ij,car,r}$ i を出発するトリップ数

もし出発する需要が、利用可能な車やバスの容量を超えると、正の潜在価格により出発台数は制限される

$$\sum_j (Q_{ij,abo} + Q_{ij,both}) \bar{n}_{ij} - \sum_{jr} N_{ij,bus,r} \geq 0 \quad \perp \quad \rho_i^T \geq 0$$

$\sum_j (Q_{ij,abo} + Q_{ij,both}) \bar{n}_{ij}$ バスのシーズンチケット保有率

2.4 Physical system (capacity) constraints

- バスの乗客の総フローは、バスの総容量を超えない

$$Z_k - \sum_{ijr} \bar{\theta}_{ijk,\text{bus},r} N_{ij,\text{bus},r} \geq 0 \quad \perp \quad \rho_k^B \geq 0$$

バスの
総容量

バスの総乗客数

もしバスの総乗客数が容量を超えると、正の潜在価格によりバス利用が制限される。
= バスが満員なので出発時の追加の待ち時間が発生する

$$Z_k = \bar{Z}_k \frac{A_{k,\text{bus}}}{A_{k,\text{bus}}}$$

現在のバス容量

input (現在)の
バスaccumulation

2.5 Economic constraints

- モビリティからの歳入（保有コスト π_t^{fix} と利用コスト π_m^{var} ）と補助金 \bar{S} が 運用費用 O に一致。

道路提供, バス運行のコスト

$$\sum_{ijt} \pi_t^{\text{fix}} \bar{n}_{ij} Q_{ijt} + \sum_{ijmr} \pi_m^{\text{var}} N_{ijmr} \bar{d}_{ijmr} + \bar{S} = O$$

モビリティ
tのシェア
経路rの平均
トリップ長

$$O = \sum_k c_k^{\text{bus}} A_{k,\text{bus}} + c_k^{\text{road}} L_k$$

単位コスト
バス台数
NWサイズ

- 道路提供コスト c_k^{road} やバス運行コスト c_k^{bus} には規模の(負)経済が働く。

= 作れば作るほど1単位あたりのコストが下がる or 上がる

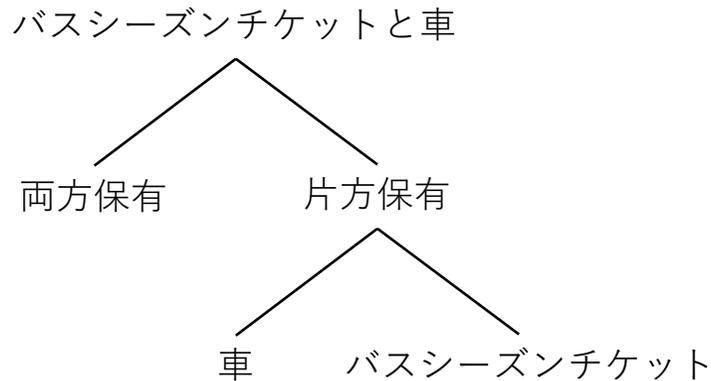
$$c_k^{\text{road}}(L_k) = \bar{c}^{\text{road}} \exp\left(\bar{\epsilon}_k^{\text{road}} \log\left(L_k/\bar{L}_k\right)\right)$$

$\bar{\epsilon}_k$: 弾力性パラメータ
(負なら規模の経済, 正なら規模の不経済)

$$c_k^{\text{bus}}(A_{\text{bus},k}) = \bar{c}^{\text{bus}} \exp\left(\bar{\epsilon}_k^{\text{bus}} \log\left(A_{\text{bus},k}/\bar{A}_{\text{bus},k}\right)\right)$$

2.6 Mobility tool ownership constraints

- モビリティツールの保有率 Q_{ijt} は現在の (inputの)保有率 \bar{Q}_{ijt} と保有コスト π_{ijt}^{total} の変化に依存
= 保有コストが高いほど保有率は減少
- Q_{ijt} の選択確率を二段階ロジットモデルで表現



$$\pi_{ijt}^{\text{total}} = \underbrace{\pi_t^{\text{fix}}}_{\text{固定コスト}} + \sum_m \underbrace{\pi_m^{\text{var}}}_{\text{利用コスト}} F_{ijtm} \left(\frac{\sum_r \bar{d}_{ijmr}}{|\mathcal{R}|} \right)$$

i, j 間の平均経路長

tool t から mode m を選ぶ割合

- toolが複数mode (carとbus両方使える)場合, OD間の全利用者のうちmode m を使う割合

$$F_{ijtm} = \begin{cases} \frac{\sum_r N_{ijmr} - \bar{n}_{ij} \sum_{t'} I_{t'm} Q_{ijt'}}{\bar{Q}_{ijt} \bar{n}_{ij}}, & \text{if } t = \text{both} \\ I_{tm}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- toolが単一modeの場合, 1

2.6 Mobility tool ownership constraints

- Q_{ijt} の選択確率を二段階ロジットモデルで表現

- 効用関数

$$u_{ij,both} = \log(\bar{Q}_{ij,both}) + \left(\frac{\pi_{ij,both}^{total}}{\bar{\pi}_{ij,both}^{total}} - 1 \right) / \bar{\mu}^M$$

$$u_{ij,not both} = \log(1 - \bar{Q}_{ij,both})$$

$$u_{ij,car} = \log(\bar{Q}_{ij,car}) + \left(\frac{\pi_{ij,car}^{total}}{\bar{\pi}_{ij,car}^{total}} - 1 \right) / \bar{\mu}^M$$

$$u_{ij,abo} = \log(\bar{Q}_{ij,abo}) + \left(\frac{\pi_{ij,abo}^{total}}{\bar{\pi}_{ij,abo}^{total}} - 1 \right) / \bar{\mu}^M$$

ASC (現在の保有率) 現在のコストからの変化

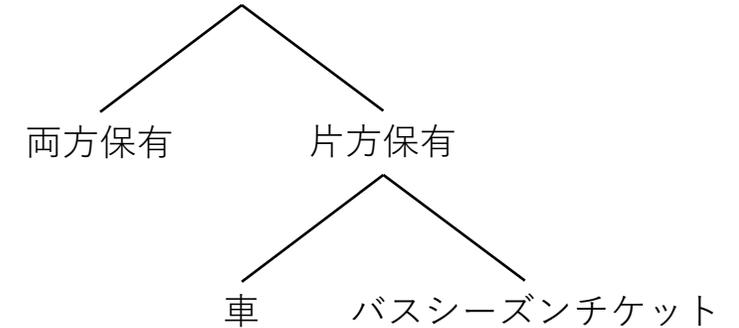
- 選択確率

$$Q_{ij,both} = \frac{\exp(u_{ij,both})}{\exp(u_{ij,both}) + \exp(u_{ij,not both})}$$

$$Q_{ij,car} = (1 - Q_{ij,both}) \frac{\exp(u_{ij,car})}{\exp(u_{ij,abo}) + \exp(u_{ij,car})}$$

$$Q_{ij,abo} = (1 - Q_{ij,both}) \frac{\exp(u_{ij,abo})}{\exp(u_{ij,abo}) + \exp(u_{ij,car})}$$

バスシーズンチケットと車



2.7 Problem formulation

- 3D-MFD-NDP (3-Dimensional Macroscopic Fundamental Diagram Network Design Problem)

$$\text{minimize } y = \sum_{ijmr} N_{ijmr} (T_{ijmr} + \frac{H_i}{2} \delta_m^{\text{bus}})$$

subject to (2)–(9) solving MCP

2.3節

and (10)–(14) solving capacity constraints

2.4節

and (20)–(22) solving ownership constraints

2.6節

and (15)–(19) solving economic constraints

2.5節

決定（設計）変数

(i) L_k : ゾーン k のネットワーク長

(ii) η_k : ゾーン k のバス専用レーンのシェア

(iii) H_k : ゾーン k のバス運行間隔

(iv) π_t^{fix} : モビリティツール t の固定コスト

(v) π_m^{var} : モード m の変動コスト

→ highly non-linearかつ非凸なので大域的最適解を見つけるのが難しい（NDP一般にも言える）

- 最近ではNDPにおいて大域的最適化アルゴリズムの研究もある
- 解法の貢献は本研究の範囲外なのでMPECソルバーである[NLPEC](#)を使う（開発途上なので頑健性や問題サイズに限界はある）

2.8 Practical limitations

- 3D-MFD-NDPにより現況を改善する開発やプライシングの方策を示したい
 - 現況再現のための変数のcalibration, 決定変数の上下限の設定, 初期値を現況通りに設定することが必須. それらが不適切だと実行不可能になる
- 感度分析でも述べるが, 価格の小さな変動が解に大きく影響し, インプリケーションを変えてしまう
- ただし, 需要の急増に対しても, 3D-MFD-NDPは実行不能にならずに, グリッドロック (平均速度0) を回避する解釈可能な解を見つけることができている.

2.9 Policy limitations

- calibrateされた点（今回であれば朝通勤の時間帯に合わせた変数）に近いほど結果の妥当性は高いので、他の時間帯を対象にするとcalibration結果が正確でなくなり、最適解を得られないかも。
- 多くの通勤者が車とバスシーズンチケットを持っている中央ヨーロッパ特有のモデル定式化なので、他の地域に適用する場合他の制約条件が必要かも
- 3D-MFD-NDPはNW全体の平均的な政策効果は調べられるが、リンクベースな政策は表現できない
- 結果がゾーンの切り方に依存するので、政策立案において投資やプライシングの方向性は示せるが、どこでやればいいのかは示せない
- 長期的な計画として朝の通勤ラッシュを想定した定式化だが、高齢化や余暇活動の増加に対する計画は想定していない。

3. Model implementation

3D-MFD-NDPの実証分析のために,

3.1 郊外から通勤者が流入するような都市の設定 (City design)

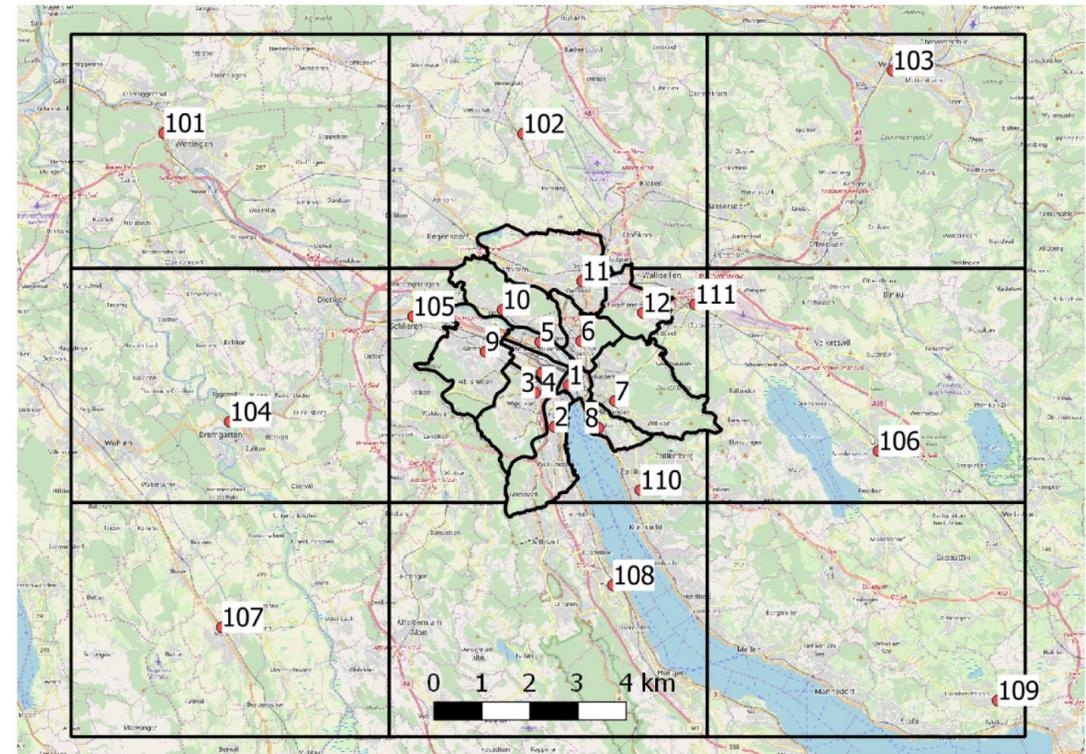
3.2 MFDのゾーンの切り方 (Zoning)

3.3 モデルパラメータのcalibration (Calibration)

を行う

3.1 City design

- 都心に職場と居住地 (Destination or Origin), 郊外に居住地 (Origin)の構造の都市を想定.
- 都市域外 (3D-MFDの対象外)にOriginを設定し, 都心への流入交通量を再現.
方向別の効果を考慮するため, 各方向にOriginを設定 (図101-109の点, 3D-MFDの対象はゾーン1-12)
- 都市域内 (3D-MFDの対象範囲内)の旅行速度は3D-MFDに従い, 都市域外 (3D-MFDの対象外)の旅行速度はBPR関数などで計算.



3.2 Zoning

- MFDは 10km^2 以内のゾーンに対して推定されることがほとんど (Geroliminis and Daganzo, 2008)
- ゾーン内は
 - 代替経路があること ← 局所的なリンク混雑が発生しない
 - 均質(homogeneous)なNWであること (よく似た道路から構成され, 右左折にinsensitiveなlink fundamental diagramを持つ)
 - 混雑具合が均一であること (homogeneously congested)
- 上を満たすゾーン分割はpartitioning methods (Ji and Geroliminis, 2012; Ambuhl et al., 2019)によって得られる。

3.3 Calibration

- Calibrationするパラメータ群
 - \bar{n}_{ij} (OD人口), \bar{Q}_{ijt} (モビリティの利用割合) — PTやセンサスなどから取得
 - $\bar{\mu}^M, \bar{\mu}^R$ (ロジットモデルのパラメータ) — PTなどから取得
 - $\bar{\varphi}_{ij}$ (利用交通手段の固有定数) — 各OD間の観測分担率と手段選択モデルの推定結果の誤差を最小にするように推定 (最小二乗法)

 - $\bar{c}^{\text{bus}}, \bar{c}^{\text{road}}, \bar{\pi}_t^{\text{fix}}, \bar{\pi}_m^{\text{var}}, \bar{c}^{\text{road}}, \bar{c}^{\text{bus}}, \bar{S}$ (価格変数) — 実際の価格から設定
 - $\bar{L}_k, \bar{B}_k, \bar{\alpha}_k$ (NWの形に関するパラメータ) — 地図から設定
 - H_k, η_k (バス間隔, 専用レーン割合) — バス会社から取得
 - \bar{P}_k (駐車場容量) — センサスから取得 or (ゾーン到着台数)*(空駐車場割合)
 - 車両存在台数(accumulation), 速度 — 所与のODに対して完璧な観測情報は得られないので, NW長 \bar{L}_k を減らしながら観測速度と推定値を近づける.
→ 使われていない道路を削除する作業に相当

4. Policy analysis

3D-MFD-NDPをZurichの朝ラッシュに適用.

4.1 Model preparation
calibration結果 →

Table 3

Price and cost information for the calibrated 3D-MFD-NDP.

Parameter or observed value	Unit	Value
\bar{c}^{bus}	(CHF/day bus) ^a	3100
\bar{c}^{road}	(CHF/day km) ^b	1900
$\bar{\epsilon}^{bus}$	(-) ^g	{0; -0.2}
$\bar{\epsilon}^{road}$	(-)	{0; 0.2}
$\bar{\pi}_{abo}^{fix}$	(CHF/day) ^c	3
$\bar{\pi}_{abo}^{var}$	(CHF/km) ^d	0
$\bar{\pi}_{car}^{fix}$	(CHF/day) ^e	5
$\bar{\pi}_{car}^{var}$	(CHF/km) ^f	0.1
$\bar{\mu}R$	(-)	10
$\bar{\mu}^M$	(-) ^h	-0.5

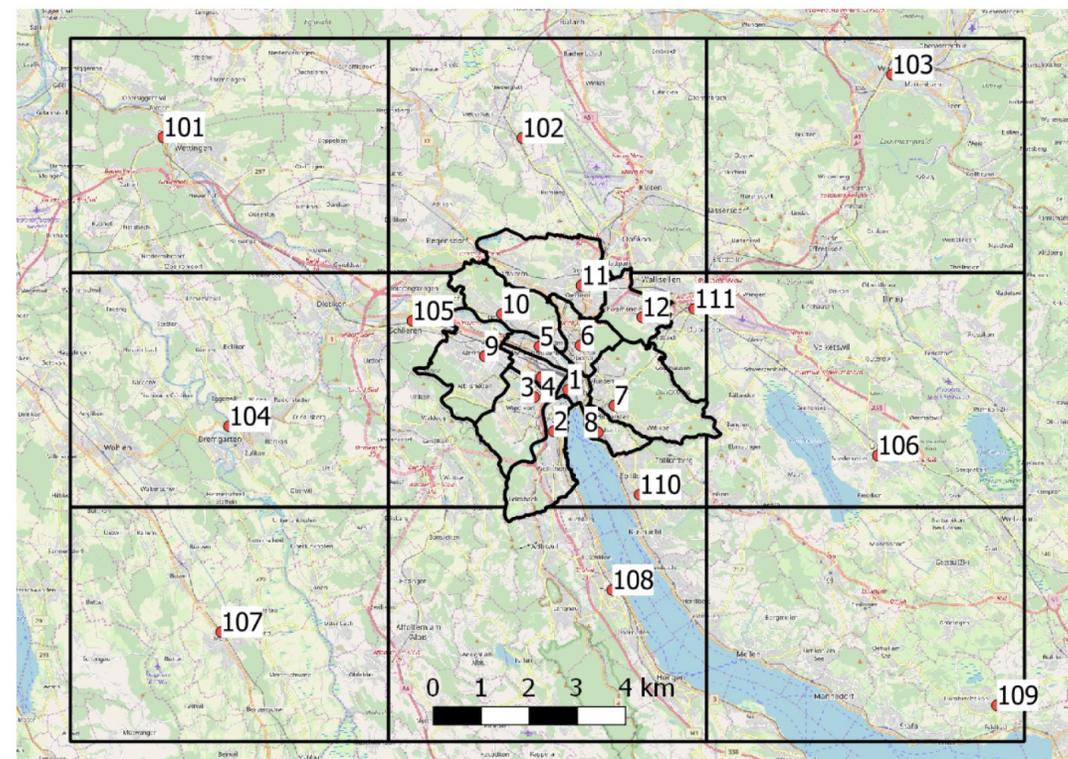
MPECを解く

4.2 2018年の現況に対するインフラとプライシングの最適化

4.3 人口20%増シナリオでの最適化

4.1 Model preparation

- ゾーン分割は既存の行政界を利用 (既存OD表を利用するため)
- 住区の道路を取り除くことで主要道路のみのhomogeneousなNWを作成
- 既往研究からZurichのOD表, 分担率, 3D-MFD関数のcalibrationを行う
- 車のコスト
 - 固定: 自動車登録税, 駐車代
 - 変動: 燃料税
- バスのコスト
 - 固定: シーズンチケット
 - 変動: なし (single rideや距離制運賃はない)



4.1 Model preparation

- mobility toolの収入が交通の公的予算にどれくらい回るかも設定
 - バス収入の60%が公的予算, 40%が鉄道事業者と州の運輸局に
 - 自動車収入の25%が公的予算, 75%は企業や炭素税に
- NDPの解が現況から離れすぎないように, 決定変数の上下限を設定

calibration結果

Table 4

Transport network calibration values for the 3D-MFD-NDP.

Observed value	Unit	Value
$\sum \bar{L}$	(km)	1400 ^a
$\sum \bar{A}_{\text{bus}}$	(bus)	1040 ^b
\bar{H}	(h)	0.125
\bar{S}	(CHF/day)	48'000 ^c
Share of car trips	(-)	0.33 ^d
\bar{Q}_{car}	(-)	0.18
\bar{Q}_{both}	(-)	0.35
\bar{Q}_{abo}	(-)	0.47

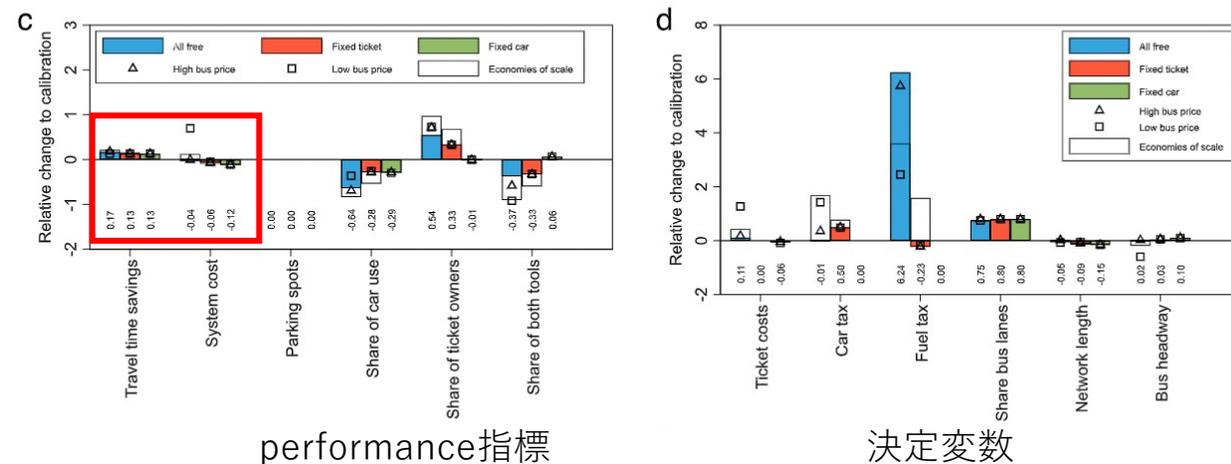
4.2 Optimization of current situation

- 政府補助金が0として現在の状況を改善する戦略を調べる
 - (i) 道路投資なし，バス投資あり（インフラはそのまま）
 - (ii) 道路投資あり，バス投資あり（インフラ建設ありの場合）
 - (iii) 道路投資あり，バス投資あり，駐車容量を30%減らす
- 上記の各シナリオについて，プライシング戦略は，
 - バス・自動車への課金額を自由に設定できる場合 (all free)
 - バスシーズンチケットの料金は現況値で固定 (fixed ticket)
 - 自動車の税金は現況値で固定 (fixed car)の3つについて分析
- 道路建設費とバス運行経費は $\pm 10\%$ で動かして感度分析

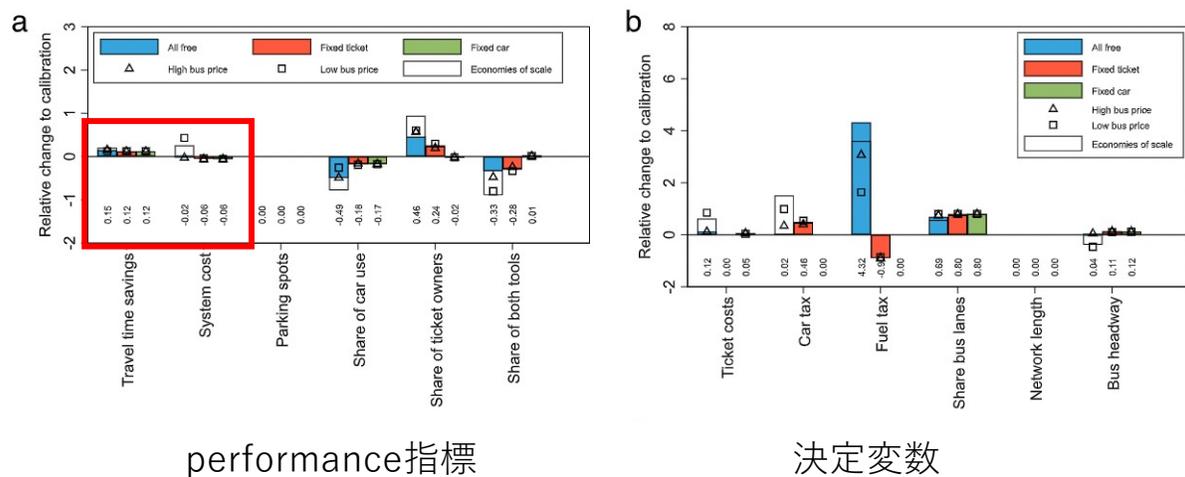
4.2.1 Global results

- 縦軸は現況との比
- システムコストをほんの少し減少させるだけで、10%以上の総旅行時間削減を達成できる
- (ii)道路投資ありの場合、(i)なしに比べてさらに総旅行時間を削減できるが、(iii)駐車容量削減の効果は小さい
- プライシングは行動変化に影響するが、駐車場の制限はほぼ影響しないのかも

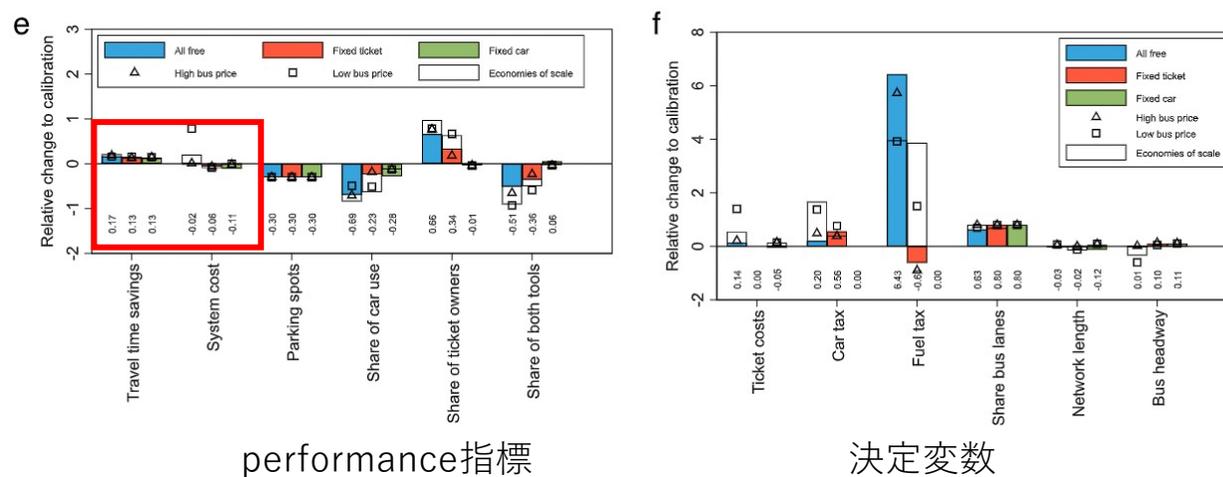
(ii) 道路投資あり, バス投資あり



(i) 道路投資なし, バス投資あり



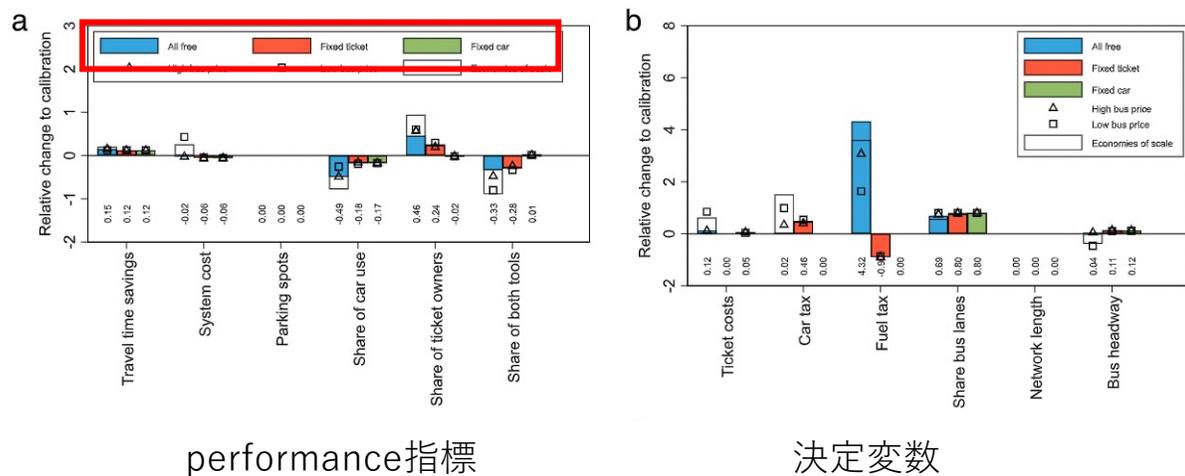
(iii) 道路投資あり, バス投資あり, 駐車容量を30%減らす



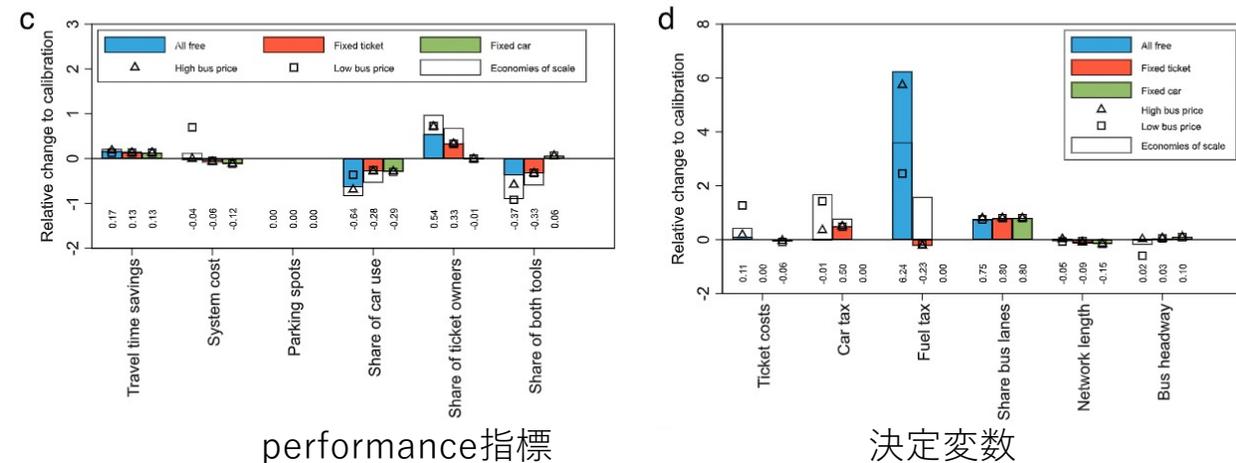
4.2.1 Global results

- プライシング戦略の違い（棒の色）については、
 - all free (青)の効果が最大で、燃料税を増加させ自動車利用を抑制している
 - バスシーズンチケットを固定した場合 (赤), 自動車登録税を増やし燃料税を減らす方向 (どっちも増やすと自動車利用率が下がりすぎて収支が合わない?)

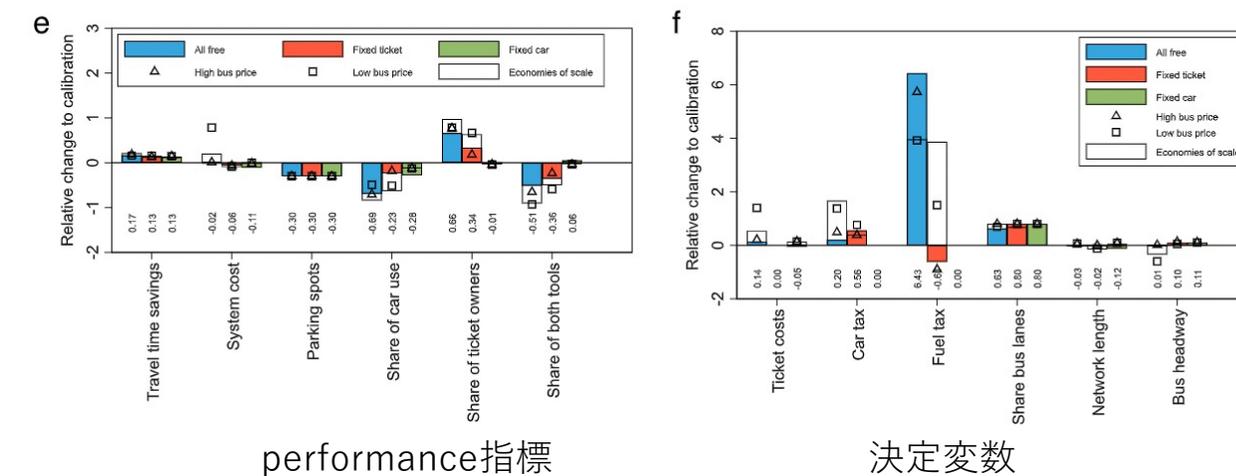
(i) 道路投資なし, バス投資あり



(ii) 道路投資あり, バス投資あり



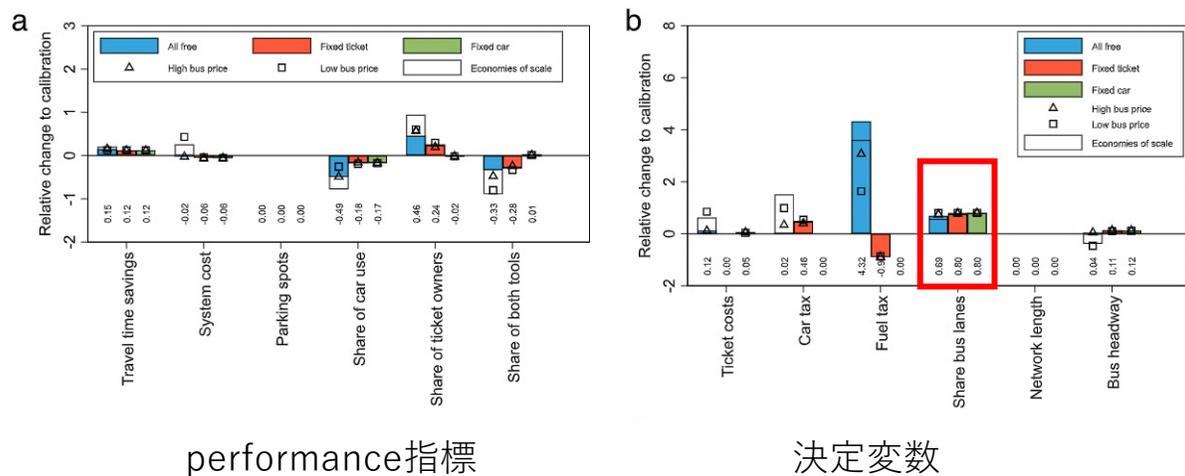
(iii) 道路投資あり, バス投資あり, 駐車容量を30%減らす



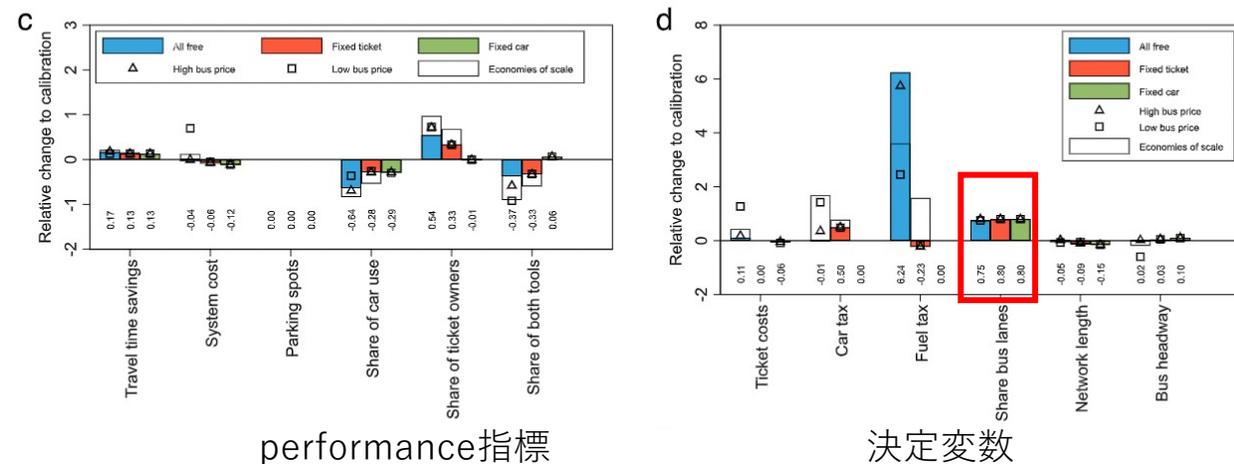
4.2.1 Global results

- どのシナリオでも、バスレーンを増やすことで総旅行時間を短縮できる

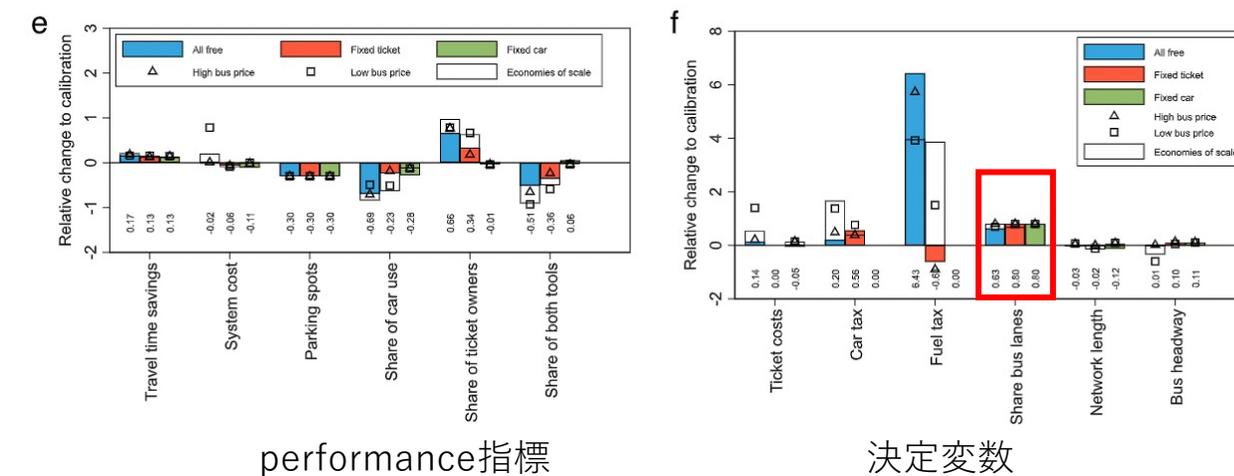
(i) 道路投資なし，バス投資あり



(ii) 道路投資あり，バス投資あり



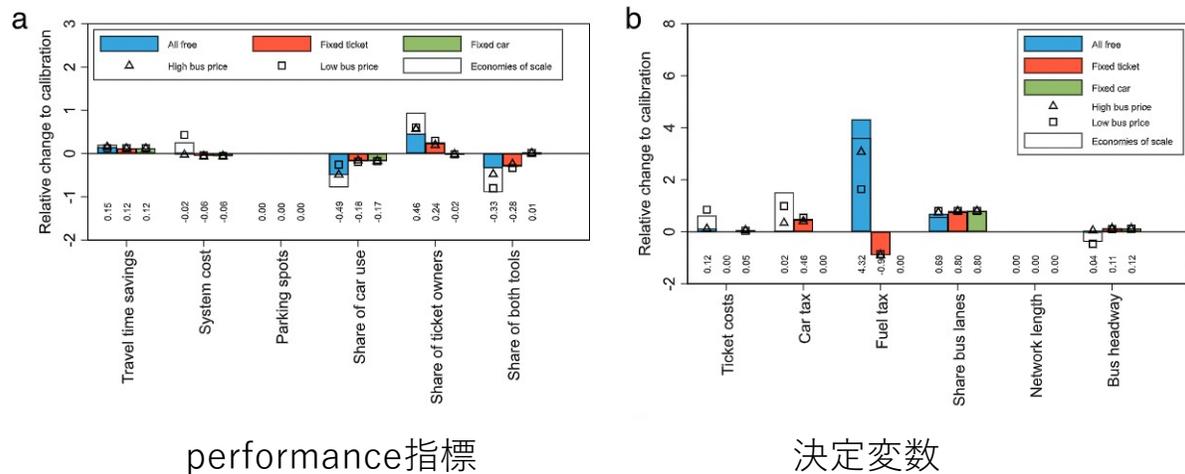
(iii) 道路投資あり，バス投資あり，駐車容量を30%減らす



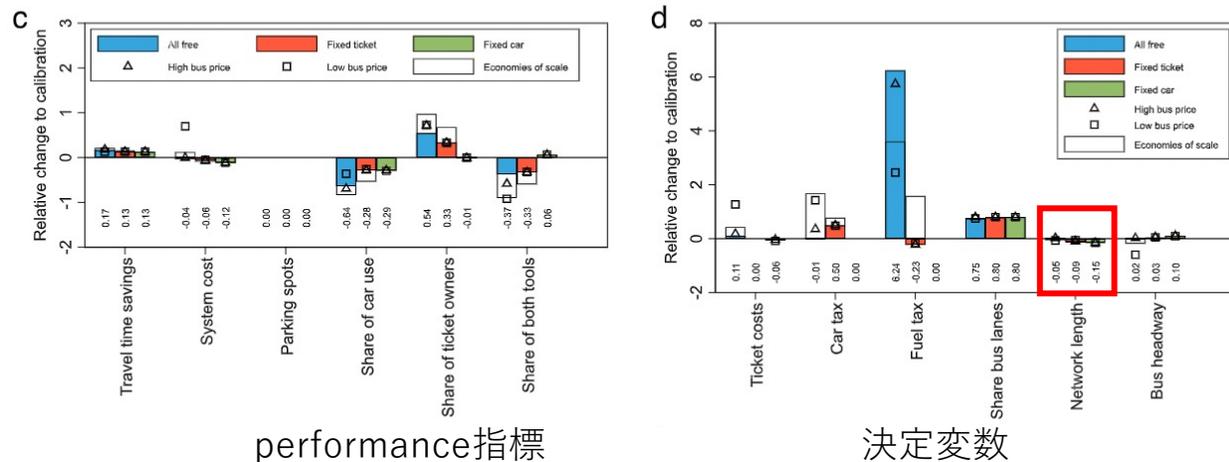
4.2.1 Global results

- 最適解においてNW長はほとんどの場合、減らす方向 (disinvestment)

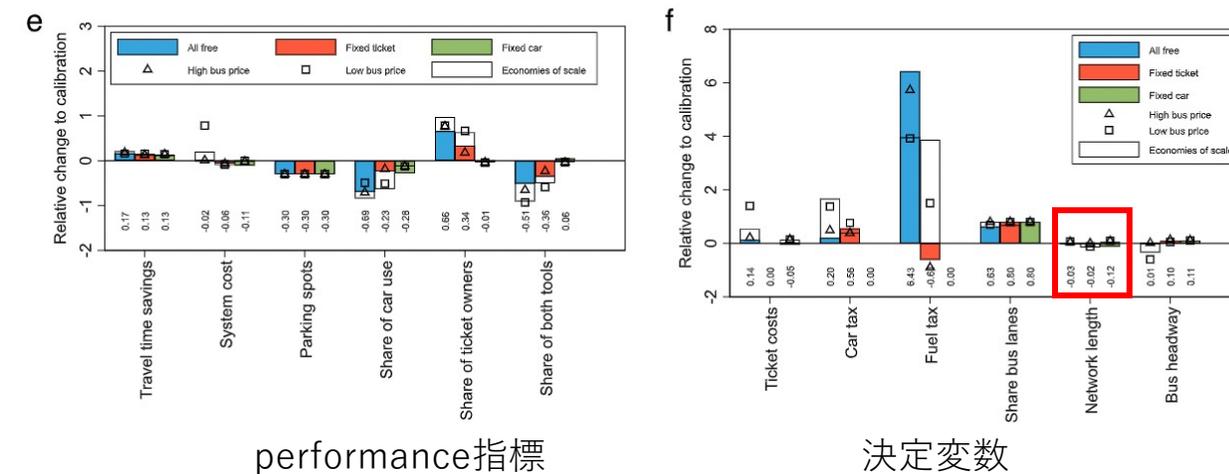
(i) 道路投資なし，バス投資あり



(ii) 道路投資あり，バス投資あり



(iii) 道路投資あり，バス投資あり，駐車容量を30%減らす

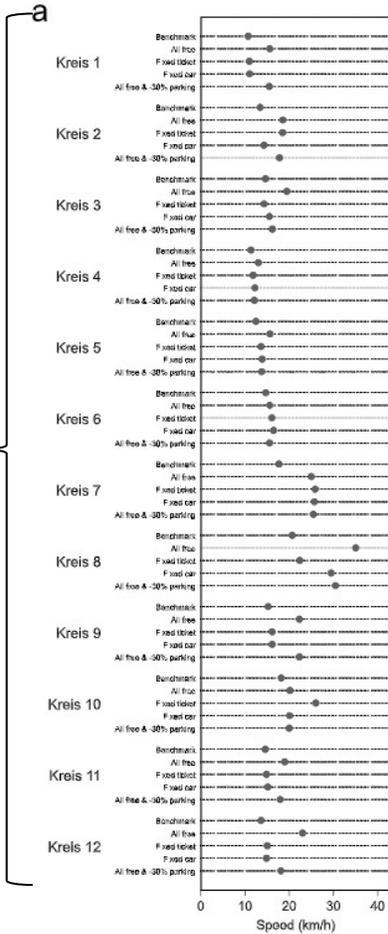


4.2.2 Local results (各ゾーンの結果)

一番上の線が benchmark

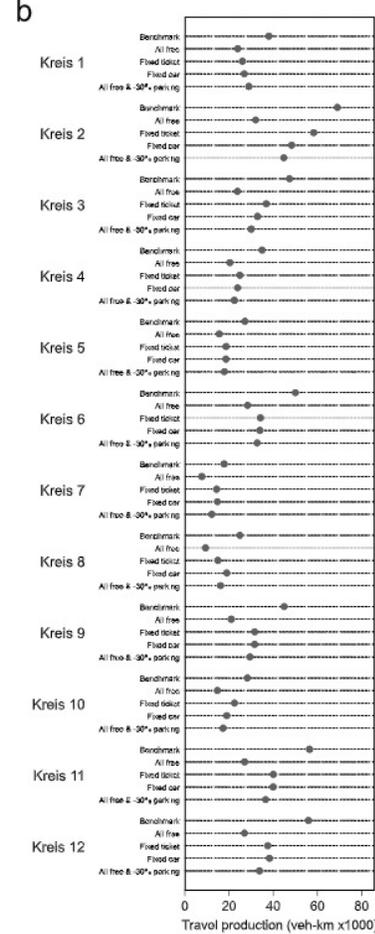
12のゾーン

車両速度の変化



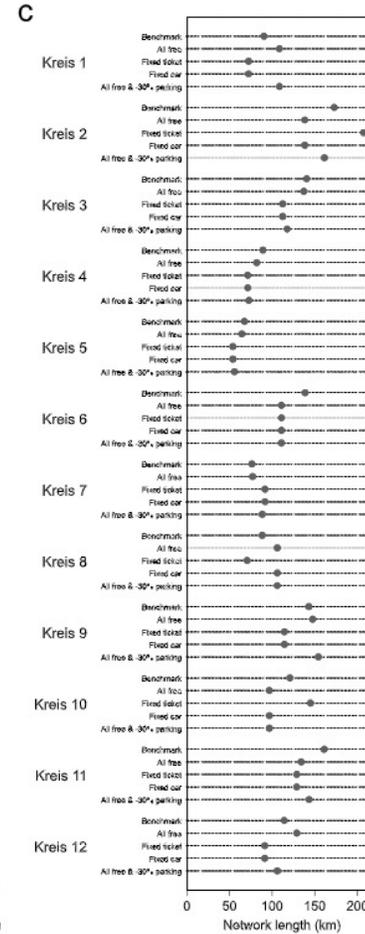
増加

production (平均交通量)の変化



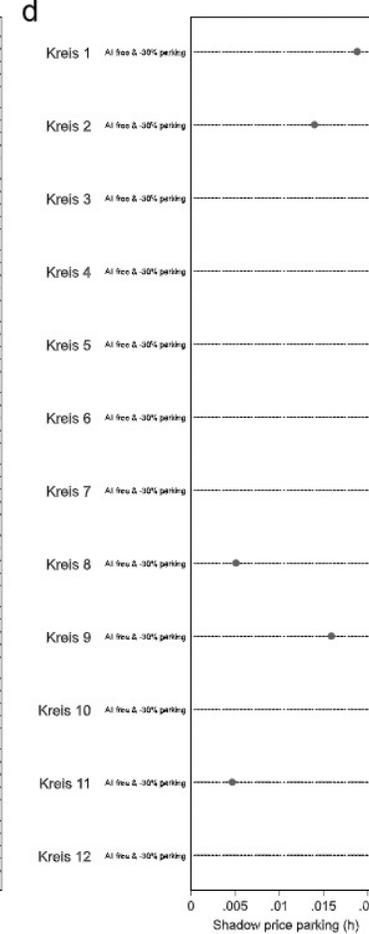
減少 = 外部不経済減少

NW長の変化



減少 = 道路施設のdisinvestment

駐車容量30%減のときの 駐車潜在価格 ρ^P



ρ^P が0のゾーンもある
=容量制約がbindしていないゾーンもある (p19)

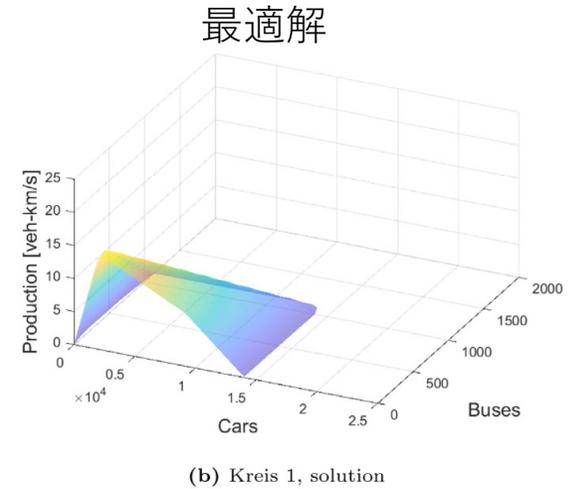
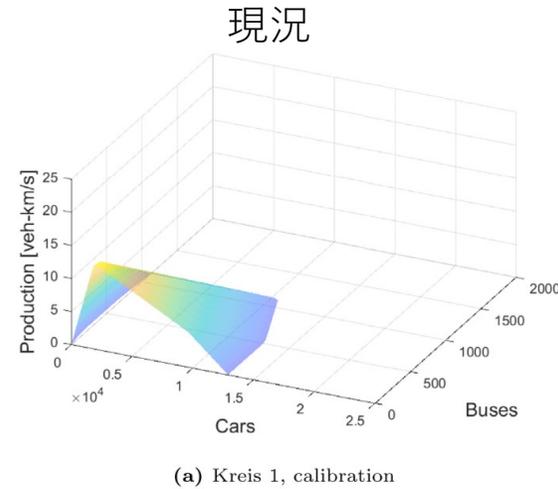
ρ^P が0でないゾーンでは駐車容量を超える到着需要を抑えるために、駐車料金を課すことで、総合旅行時間減少を達成してる

4.2.2 Local results (各ゾーンの結果)

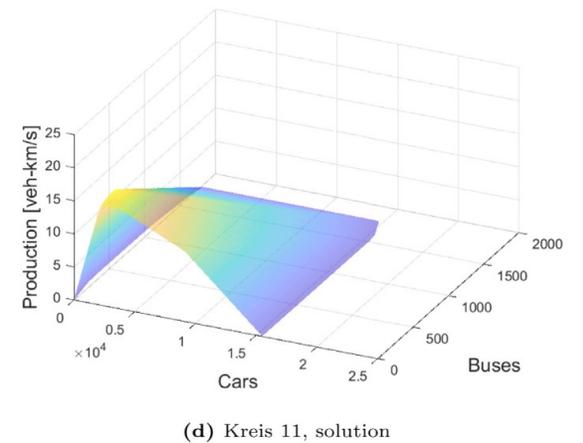
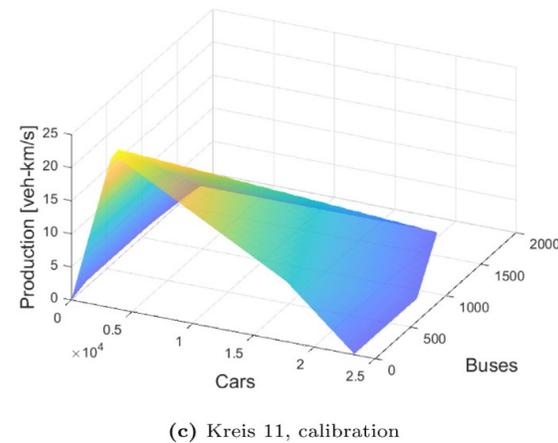
3D-MFDも確認

- 使用されるインフラの割合は減少
- ゾーン1は道路NWとバス専用レーンを両方拡張しているのので、自動車のパフォーマンスは増加
- ゾーン11はバス専用レーンが増えて道路NWは減少しているのので、自動車のパフォーマンスは減少

ゾーン1

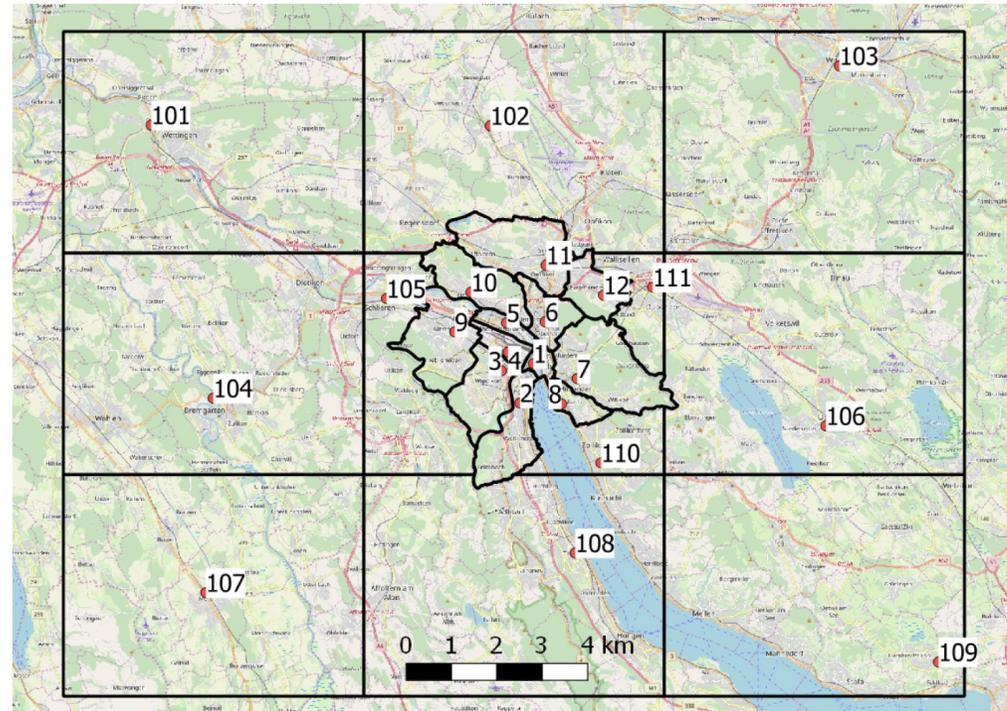


ゾーン11



4.3 Scenario population growth

- 人口が20%増加した場合にシステムが適応できるか，最適なpricingはどのようなものか調べる
 - (i) 全地域で均一に成長 (even distribution)
 - (ii) 都市域内 (zone1-12)に開発が集中 (concentration)
 - (iii) 都市域外 (zone100-111)に新住民が居住 (urban sprawl)

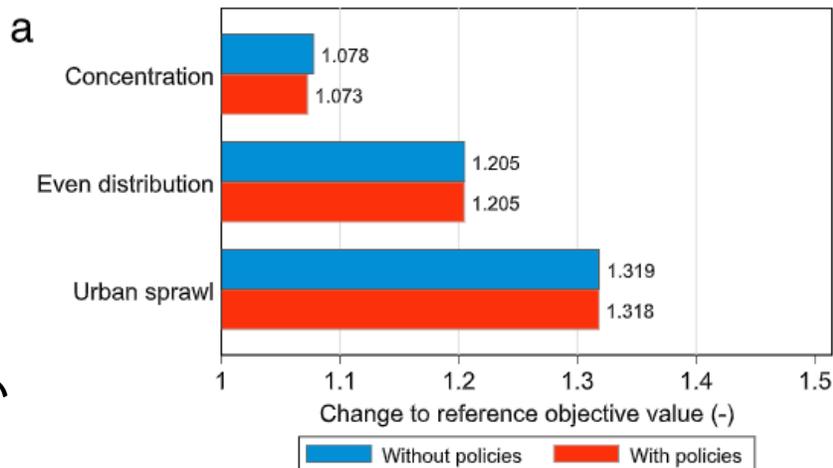


4.3 Scenario population growth

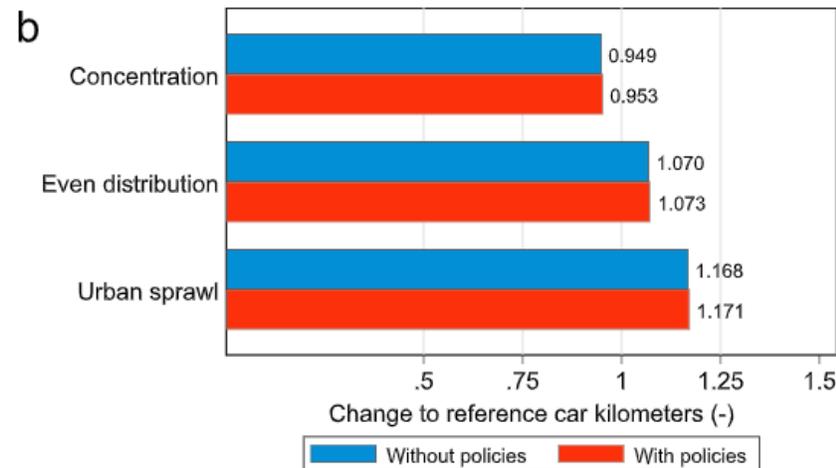
・総旅行時間は需要が増えるほど増加

・都心集中ケースは上げ幅が小さい(トリップ長が短い)

・with/withoutで違いはほとんどない



・with/withoutで自動車の旅行距離もほぼ同じ

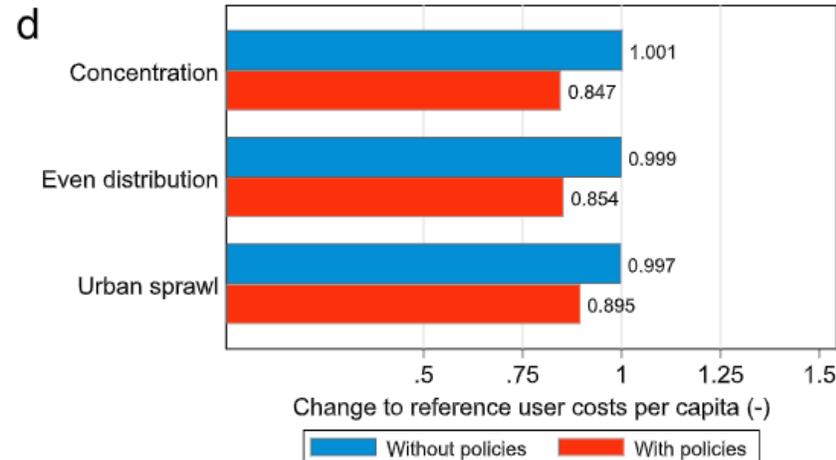
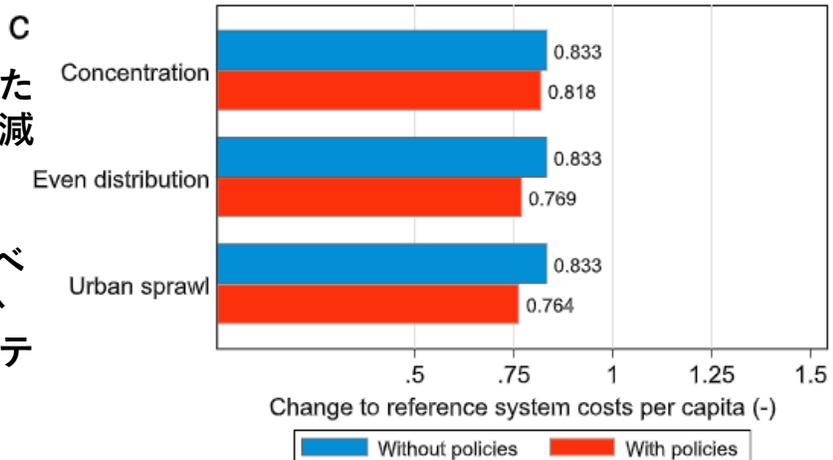


・人口増によりuserコストは減少

・sprawlに比べてconcentrationのuserコストが小さい
← 郊外の通勤者は自動車利用の高いコストを払う必要があるため

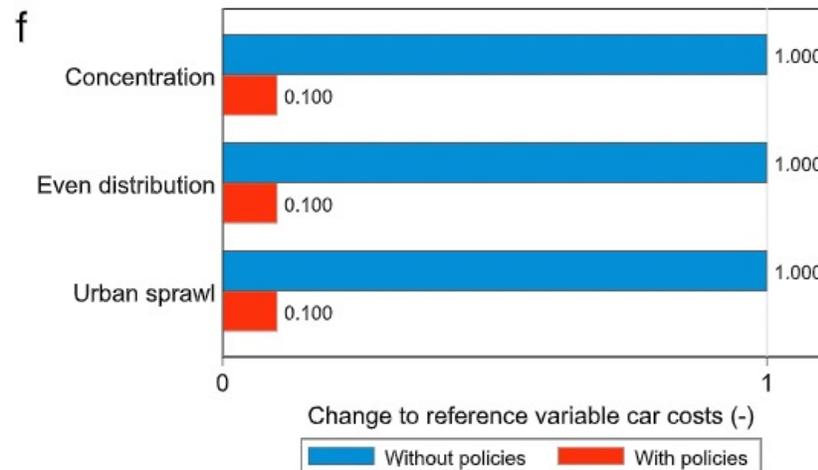
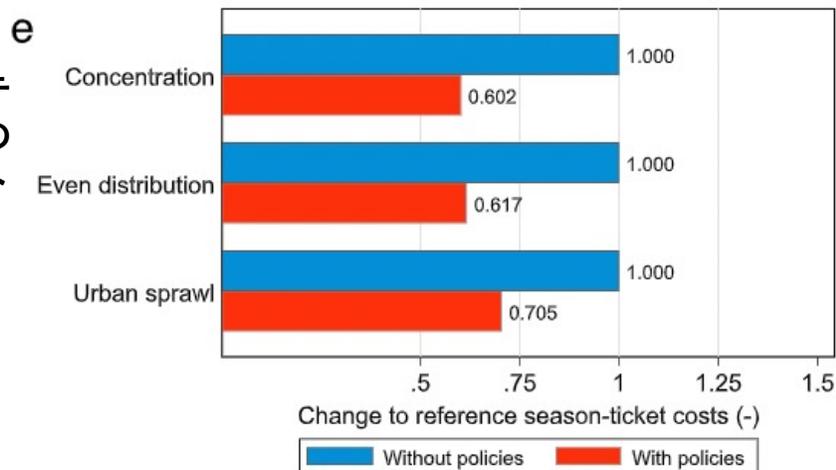
・人口増により一人当たりのシステムコストは減少

・concentrationに比べsprawlのバス台数は少なくて済むので、システムコストも小さい



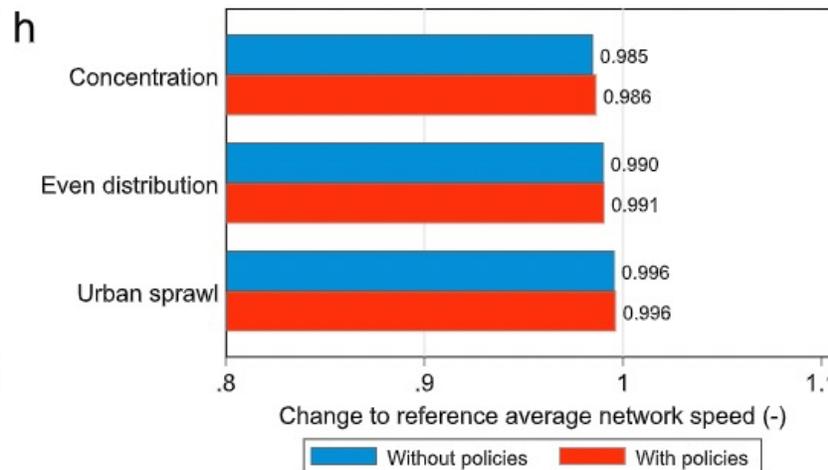
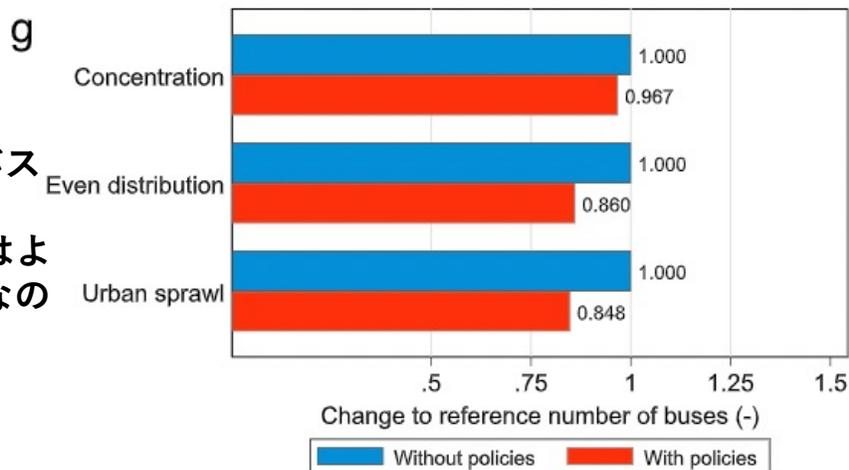
4.3 Scenario population growth

・一人当たりのシステムコストが減少するので、シーズンチケットの料金も減少



・一人当たりのシステムコストが減少するので、自動車の税金も減少

・sprawlケースでは concentrationよりバス台数が減少
← concentrationではより多くのバスが必要なので



・需要増により平均速度は減少、concentrationの方が顕著。

4.3 Scenario population growth

モデルの限界

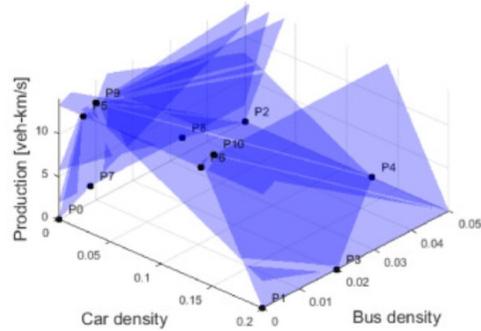
- 普通ヨーロッパでは、モビリティの料金が変わると、モビリティツール（定期や自動車）を**保有**するか否かの選択が影響を受けるが、交通はそれほど影響を受けない。モビリティのコストと**利用**を直接つなげるには、複数のモビリティツールの保有を制限すべき。
- congestion pricingは含まれていない
- MPECソルバーの性能に限界があるので、局所解に陥ってimplicationが影響を受けているかも

5. Conclusion

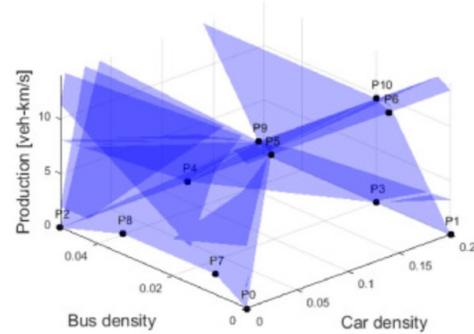
- マルチモードのMFDを使ったネットワークデザインを提案し、3D-MFDの関数を用いて均衡制約付き数理計画問題(MPEC)として定式化した (3D-MFD-NDP)
 - 需要の配分と収支バランスの制約のもと、総システムコストを最小化するネットワークと料金を決定
 - road network design, bus network design and operations, 専用レーン割り当て, 料金決定を一つの最適化問題で書いたのがすごい
- 自動車登録税と燃料税を増やして公共交通に投資するのは驚くべき結果ではないが、3D-MFD-NDPは最適解への方向性と程度を理解するのに役立つ
- 今後の方向性は,
 - (i) 目的関数はcost-based, welfare-based, accessibility-basedなど工夫の余地あり
 - (ii) 朝通勤以外の需要にも適用
 - (iii) 人口分布を考慮
 - (iv) 先端的なMFDの研究と、二段階最適化・MPECの研究の導入
 1. MFDを用いた動的交通量配分の研究
 2. 精緻なcalibrationがとても大切
 3. 歩行者や自転車など他のモードとの相互作用のモデル化
 4. BraessのパラドックスがMFDに与える影響は未だ分かっていない

(補足) 3D-MFDの関数形

- Loder et al. (2019)は3D-MFDを表現する関数形を提案



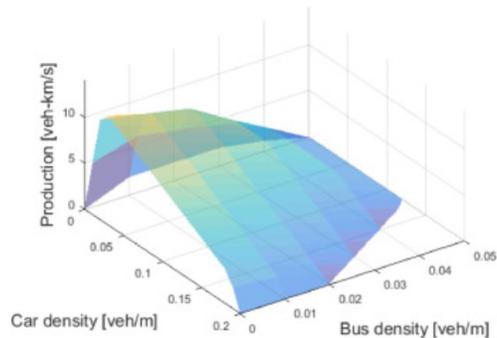
(a) Planes I-VII, view A



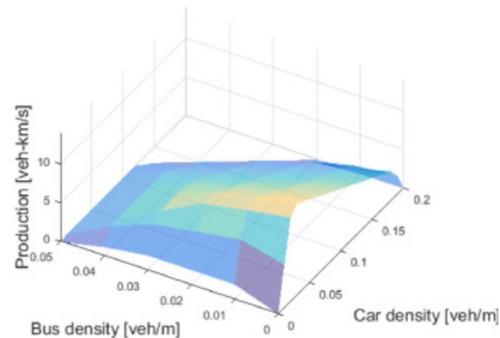
(b) Planes I-VII, view B

いくつか点を取り、そこでの微分値から3D-MFDを近似する平面群を作り、平滑化する。

$$\Pi(\mathbf{N}) = -\lambda(\mathbf{N}) \log \left(\exp \left(-\frac{\Pi_1(\mathbf{N})}{\lambda(\mathbf{N})} \right) + \exp \left(-\frac{\Pi_2(\mathbf{N})}{\lambda(\mathbf{N})} \right) + \dots + \exp \left(-\frac{\Pi_J(\mathbf{N})}{\lambda(\mathbf{N})} \right) \right)$$



(c) 3D-MFD with planes I-VII, view A



(d) 3D-MFD with planes I-VII, view B