

理論談話会 #13

# 多目的最適化に基づく歩行者の活動 ネットワークデザイン

大山雄己, 羽藤英二

都市計画論文集Vol.52(3), pp.810-817, 2017.

B4 須賀 拓実

# 目次

1. はじめに
2. 研究のフレーム
  1. 本研究の位置づけ
  2. ネットワーク上の歩行者回遊行動
  3. 問題の定義
3. モデルの定式化
  1. 上位問題:歩道幅員拡幅問題
  2. 下位問題:歩行者の活動配分問題
4. ネットワーク更新法による求解
  1. 近傍構造
  2. リンクパフォーマンス
5. ケーススタディ
  1. ネットワークの正規化
  2. 効用関数の設定
  3. 松山中心市街地ネットワーク
  4. 計算結果
6. おわりに

# 1. はじめに

- 歩行者の活動を主眼に置いた外部空間デザインが都市政策上の関心を集めている
- 歩行者の回遊行動は高解像度な空間選択行動を基本とし、複数の移動・活動が時間軸上で相互作用しあう時間配分的な性質を持つ
- 需要サイドから回遊行動モデルの理論的展開は見られる一方、歩行者政策を扱う供給サイドの研究は進まず
- 大山・羽藤(2016)<sup>※1</sup>は回遊行動を時空間ネットワーク上のパス選択行動として記述し、高解像度で確率的な活動配分問題の計算手続きを提示
  - 個人に着目した回遊パターン、それを集計した街路通行量・施設滞在時間を同時にアウトプット可能に
- 活動配分モデルによるネットワーク評価<sup>※1</sup>をもとに、地区の総滞在時間/期待効用を最大化させる、リンクの歩道幅員決定問題を提示
- 多目的な二段階最適化問題として定式化し、ネットワーク更新法で求解
- 最適ネットワークのバリエーションの提示が目的

※1: 大山 雄己, 羽藤 英二, 2016. 時空間制約と経路相関を考慮した歩行者の活動配分問題. 都市計画論文集Vol.51(3), 680-687

# 2. 研究のフレーム

## 2.1 本研究の位置づけ

- Network Design Problem(交通需要モデルを下敷きに、利用者行動への影響を明示的に考慮して交通ネットワークの最適化を行う研究)
  - 例)公共交通計画:乗客のトリップ配分問題を下位問題として運行経路・頻度・時刻表を決定
  - 例)車両交通:均衡配分問題を下敷きに道路ネットワークの拡張計画問題
- Kang et al.(2013)はActivity-based Network Design Problem (ANDP)を提示
  - トリップベースでなくOD表を所与としない
  - 旅行者の時間利用行動への影響を考慮
- **本研究は歩行者のANDPを扱う(←新規性)**
  - 歩行者行動は高解像度なネットワーク上で行われる確率的な意思決定で複雑
- 大山・羽藤(2016)の歩行者の活動配分手法を用いてNDPへ展開

# 2. 研究のフレーム

## 2.2 ネットワーク上の歩行者回遊行動

- $G = (N, A)$ : ネットワーク  $N$ : ノードの集合  $A$ : リンクの集合
- $n^m \in N^m$ : 通過ノード  $n^s \in N^s$ : 滞在可能ノード  $a^m \in A^m$ : 移動リンク  
 $a^s \in A^s$ : 滞在リンク
- 一定の時間間隔 $\tau$ [m]を持つ離散時間 $t = \{0, 1, \dots, T\}$ を考える。実時間は $T \cdot \tau$ [s]
- 個人の状態は時間とリンクの組み合わせとして、 $s_t = a$ のように書ける
- 活動経路 $\psi_{0:T} = [s_0, \dots, s_T]$ の選択行動として歩行者の回遊行動を考える

### 仮定

1. 移動手段は徒歩のみ、歩行速度は個人によらず $v_w$ で一定
2. マルコフ決定過程(時間 $t$ ごとに次の状態へ遷移)推移はランダム効用最大化ルールに従う
3. 各個人が0から $T$ 時点までマルコフ決定過程に基づく状態推移を繰り返して活動経路 $\psi_{0:T}$ が出る
4.  $s_0 = o, s_T = d$ は所与。  $d$ は吸収状態。時間制約よりも早く終了地点 $d$ に到着可能

# 2. 研究のフレーム

## 2.3 問題の定義

- 街路空間再配分(自動車空間を歩行空間に割り当て直す施策)に着目  
例)松山市・花園町通り…既存市街地に新たな回遊動線を生むことが期待される
- 街路空間上のミクロスケールな行動より1km四方の回遊行動に着目  
→歩道幅員 $n_a[m]$ ( $\forall a \in A^m$ )のみを計画変数としてその決定問題を扱う
- 二段階最適化問題  
ネットワークの条件(歩道幅員)変化  
→時空間上の歩行者の活動領域変化  
→変化した活動パターンに応じて再びネットワーク最適化

# 3. モデルの定式化

## 3.1 上位問題:歩道幅員拡幅問題

- $n_a^{min} \leq n_a \leq n_a^{max}, \forall a \in A^m$  を満たすように  $n_a$  は決定される
- 歩行者の活動量最大化の目的関数  $z_1$  と歩道拡幅面積最小化の目的関数  $z_2$  に対するパレート解の集合を求める多目的最適化問題

- 地区の(移動時間を含む)平均滞在時間最大化の目的関数  $z_{1.1}$

$$\max z_{1.1} = \sum_{a \in A} \sum_t f_a^t \tau / \sum_{s_0, s_T} Q_{s_0, s_T}$$

- $f_a^t$ : 時点  $t$  におけるリンク  $a$  のフロー
- $\tau$ [s]: ネットワーク離散化の時間単位
- $Q_{s_0, s_T}$ : 初期状態  $s_0$ 、最終状態  $s_T$  を制約条件としてもつ交通量

- 総期待効用最大化の目的関数  $z_{1.2}$

$$\max z_{1.2} = \sum_{s_0, s_T} Q_{s_0, s_T} S_{s_0, s_T}$$

$S_{s_0, s_T}$ :  $s_0, s_T$  に対応する期待最大効用

- $z_{1.1}, z_{1.2}$  それぞれについて最適化計算を行い、最適解を比較する
- 歩道拡幅面積最小化の目的関数  $z_2$

$$\min z_2 = \sum_{a \in A^m} (n_a - n_a^{min}) l_a$$

$l_a$ [m]: リンク  $a$  のリンク長

# 3. モデルの定式化

## 3.2 下位問題:歩行者の活動配分問題

### 活動経路選択モデル(1)

- 個人が状態 $s_t = a$ から $s_{t+1}$ へ推移するとき、 $v_t(a'|a) + V_{t+1}^{ST}$ を最大化するように選択行動を行うと仮定
- $v_t(a'|a)$ :  $s_{t+1} = a'$ への遷移に関する直接的な効用
- $V_{t+1}^{ST}$  ( $= V_{t+1}$ ):  $s_{t+1} = a'$ へ遷移した際の期待最大効用。 $s_{t+1}, s_T$ により形成される時空間プリズムの期待効用の評価関数
- Bellman方程式より

$$V_t(a) = \max_{s_{t+1}} E \left[ \sum_{\tau=t}^T \beta^{t-\tau} u(s_{\tau+1}|s_\tau) \right] = E \left[ \max_{a' \in A_t(a)} \{v_t(a'|a) + \beta V_{t+1}(a') + \mu \varepsilon_{t+1}(a')\} \right]$$

- $\varepsilon$ : 遷移効用の誤差項。タイプIのi.i.d.極値分布(ガンベル分布)に従う
- $\mu (> 0)$ : ガンベル分布のスケールパラメータ
- $A_t(a)$ :  $s_t = a$ に接続する次辞典の状態集合で $\Delta_t(a'|a) = 1, \forall a' \in A_t(a)$ を満たす
- $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ : 期待最大効用に対する時間割引率。意思決定の動学性を表すパラメータ。 $\beta = 1$ の時プレトリップ型活動経路選択、 $\beta = 0$ の時状態ごとの逐次的な意思決定



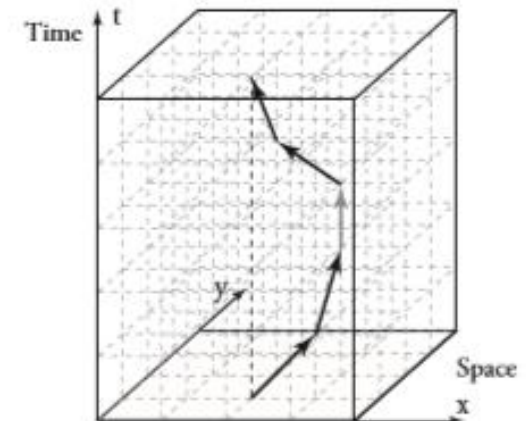
# 3. モデルの定式化

## 活動経路選択モデル(2)

- $\Delta_t(a'|a)$ : 初期状態  $s_0$ 、最終状態  $s_T$  に依存して決まる時空間ネットワーク上の状態接続条件
- $s_0, s_T$  によって定義される時空間プリズム上に状態  $s_t = a, s_{t+1} = a'$  が含まれ、かつ  $a, a'$  が空間的に接続していれば  $\Delta_t(a'|a) = 1$
- そうでなければ  $\Delta_t(a'|a) = 0$

(A) Activity path in time-structured network

$$\psi = [s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5] = [8, 9, 14, 14, 13, 8]$$



(A) Prism  $s_0, s_T = 13$

(B) Bundle  $s_0, s_2, s_3, s_T = 13$

(C) Domain  $s_0, s_T = 13, s_t \in D$

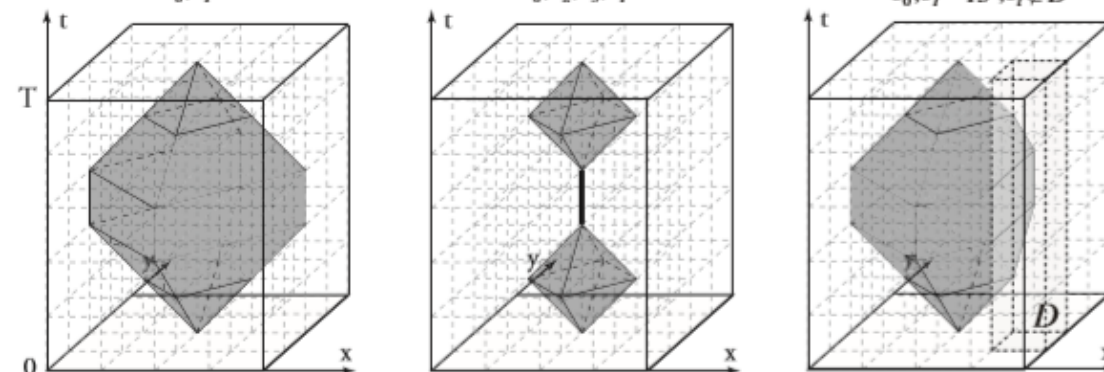
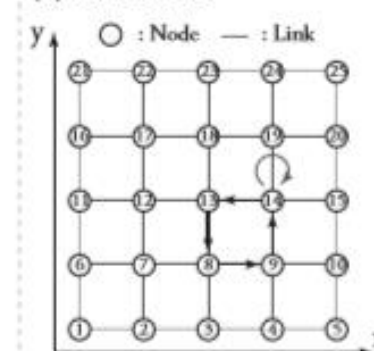


図2 時空間制約による活動経路集合の限定

(B) Route choice



(C) Time use

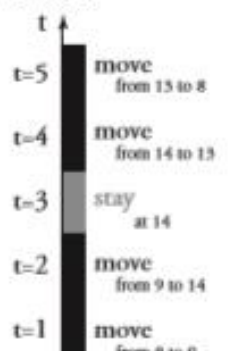


図1 時間構造化ネットワーク上の活動経路

# 3. モデルの定式化

## 活動経路選択モデル(3)

- 状態  $s_t = a, s_{t+1} = a'$  間の遷移確率はMNLモデルで定式化され

$$p_t(a'|a) = \frac{\Delta_t(a'|a) e^{\frac{1}{\mu}\{v_t(a'|a) + \beta V_{t+1}(a')\}}}{\sum_{a' \in A} \Delta_t(a'|a) e^{\frac{1}{\mu}\{v_t(a'|a) + \beta V_{t+1}(a')\}}}$$

- ログサムを用いると

$$V_t(a) = \begin{cases} \mu \log \sum_{a' \in A} \Delta_t(a'|a) e^{\frac{1}{\mu}\{v_t(a'|a) + \beta V_{t+1}(a')\}} & (t \neq T \wedge a \neq d) \\ 0 & (t = T \vee a = d) \end{cases}$$

- 時間構造化ネットワークでは計算対象からサイクリック構造が除去され、 $V$ は後ろ向き帰納法により求められる
- $t = 0$ におけるリンク  $o$  の交通量を  $f_o^0 = Q_{s_0, s_T} (s_0 = o, s_T = d \text{ のペアごとの交通量})$  とすると

$$f_a^{t+1} = \sum_{a' \in A} p_t(a|a') f_{a'}^t$$

- $t = T$ まで順番に繰り返せばリンク交通量  $f_a^t (\forall t \in \{0, T\}, \forall a \in A)$  が求まる
- $f_a^t \tau$ : リンク滞在時間
- 空間的な集計リンクフロー  $f_a = \sum_{t=0}^T f_a^t$

# 4. ネットワーク更新法による求解

- $\neg \{ \exists G \in F, z_1 \geq z_1^{(h)} \wedge z_2 \leq z_2^{(h)} \}$ の時、 $G^{(h)}$ はパレート解
- 評価値 $(z_1^{(h)}, z_2^{(h)})$ を持つ新しいネットワーク $G^{(h)}$ をパレート支配する解が $F$ (パレート解の集合)に存在する場合は $G^{(h)}$ が棄却
- 存在しなければ新しいパレート解として採択
- 予め設定された回数 $N$ だけネットワーク更新と配分計算を繰り返し、パレート解の集合 $F$ が出力される

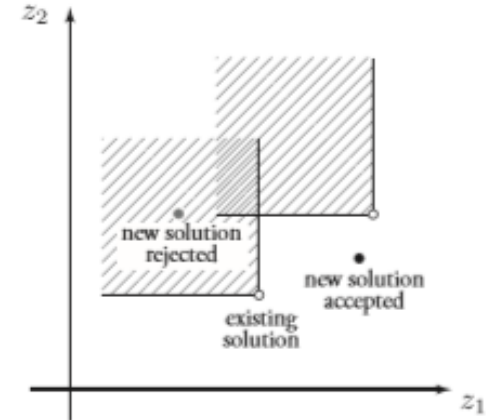


図2 解の採択条件

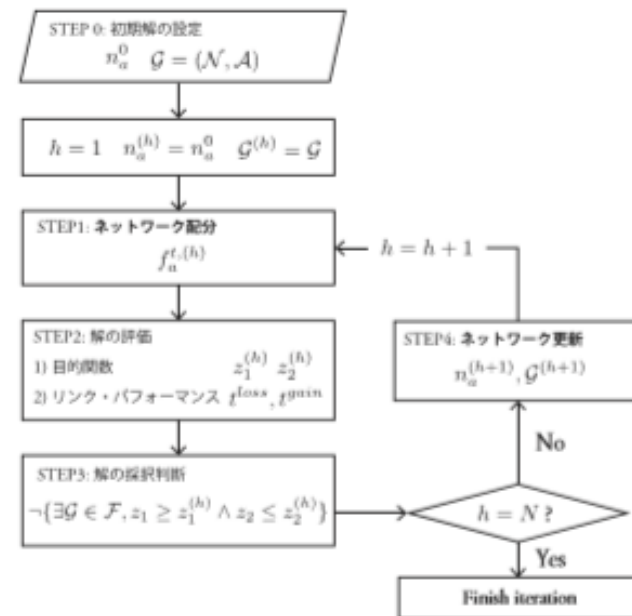


図3 ネットワーク更新法のフロー

# 4. ネットワーク更新法による求解

## 4.1 近傍構造

- 更新アルゴリズムとしての近傍構造( $\hat{n}[m]$ :解(歩道幅員)の更新単位)

### a. Decrease-random-width

$n_a - \hat{n} \geq n_a^{min}$ を満たすリンク $a \in A^m$ をランダムに1つ選び、歩道幅員 $n_a$ を $\hat{n}$ 減少させる

### b. Increase-random-width

$n_a + \hat{n} \leq n_a^{max}$ を満たすリンク $a \in A^m$ をランダムに1つ選び、歩道幅員 $n_a$ を $\hat{n}$ 増加させる

### c. Decrease-worst-width

$n_a - \hat{n} \geq n_a^{min}$ を満たす中でworstと定義されたリンク $a \in A^m$ の歩道幅員 $n_a$ を $\hat{n}$ 減少させる

$\varphi_a^{loss} = \{v_a(n_a^{(h)} - \hat{n}) - v_a(n_a^{(h)})\} \cdot f_a^{(h)}$  (歩道幅員の減少により失う効用)が最小のリンク

### d. Increase-best-width

$n_a + \hat{n} \leq n_a^{max}$ を満たす中でbestと定義されたリンク $a \in A^m$ の歩道幅員 $n_a$ を $\hat{n}$ 増加させる

$\varphi_a^{gain} = \{v_a(n_a^{(h)} + \hat{n}) - v_a(n_a^{(h)})\} \cdot f_a^{(h)}$  (歩道幅員の拡幅により得る効用)が最大のリンク

## 4.2 リンクパフォーマンス

- リンクパフォーマンス $\varphi_a^{loss}, \varphi_a^{gain}$ について

- $v_a(\cdot)$ :リンク $a$ の推移効用関数(確定項)

- $n_a^{(h)}, f_a^{(h)}$ : $h$ 回目のネットワーク(解)におけるリンク $a$ の歩道幅員、交通量

# 5. ケーススタディ

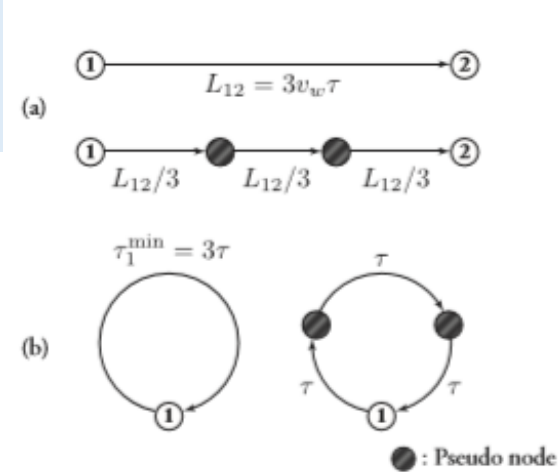


図4 ネットワークの正規化

## 5.1 ネットワークの正規化

- リンク/ノードの通過/滞在時間が $\tau$ [s]より長い  
→疑似ノード挿入で本来の通過/滞在時間に

## 5.2 効用関数の設定

$$v_a(a) = \theta_1 tt_a + (\theta_2 x_a^w + \theta_3 x_a^s) \left( \frac{l_a}{L} \right) + \theta_4 \int_{t\tau}^{(t+1)\tau} (x_a^c + x_a^d \omega) d\omega$$

旅行時間      歩道/商店街の移動の効用      滞在効用

- 推移効用 $v_t(a|k)$ は時点 $t$ 、推移先のリンク $a$ のみに依存するとする
- 説明変数: $l_a$ [m](リンク長)、 $x_a^w$ [m](歩道幅員)、 $x_a^s$ (商店街ダミー変数)
- 滞在リンクの効用は $\omega$ [s](回遊開始からの経過時間)に依存
- 滞在効用の導関数を $\dot{v}_a(\omega) = x_a^c + x_a^d \omega$ , ( $x_a^c > 0, x_a^d < 0$ )と定義
- $\theta$ :説明変数の係数ベクトル、 $x_a^c, x_a^d$ :滞在効用のパラメータ
- $tt_a = l_a/v_w$ [s]:リンク $a$ の旅行時間
- $l_a/L$ :効用に対するリンク長効果の項
- ネットワークの正規化を行うため $l_a/L = 1, l_a/v_w = \tau, \forall a \in A^m$

# 5. ケーススタディ

## 5.3 松山中心市街地ネットワーク

- 大街道と銀天街を商店街( $x_a^s = 1$ )
- 商店街沿いを中心に滞在可能ノードを配置
- 回遊の始点/終点ノードは駐車場/鉄道駅のノードに効用0のダミーリンクで接続
- 空間的に接続する全ノードペア間に双方向のリンクが存在、属性値は全て同等
- 移動リンク64、滞在リンク10、流入/流出ダミーリンク8

商店街では  $n_a^{min} = n_a^{max}$   
 幅が起これない

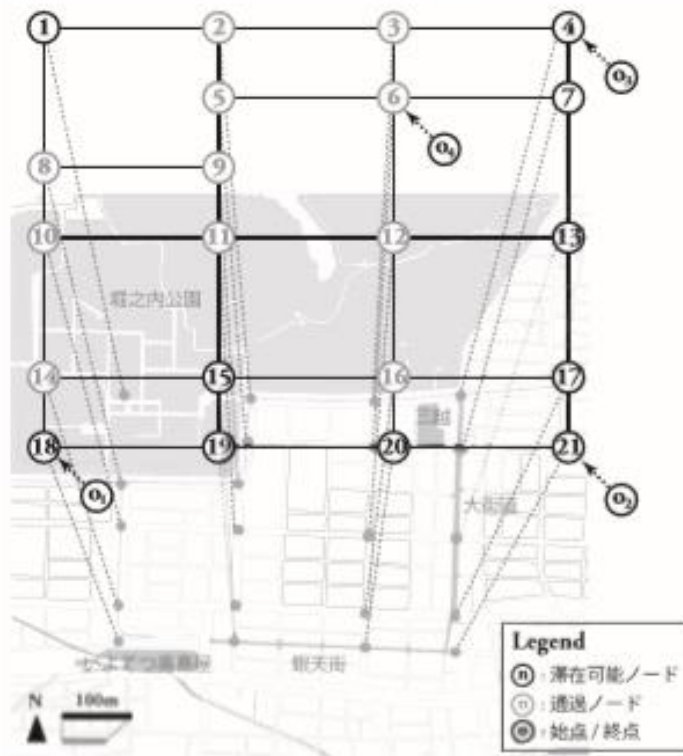


図5 松山市の中心市街地ネットワーク

表1 リンクの属性

i	j	$l_a$	$n_a^{min}$	$n_a^{max}$	$x_a^s$	$x_a^c$	$x_a^d$	$\tau_a^{min}$
1	2	200	8	8	1	0	0	-
2	3	300	4	8	0	0	0	-
3	4	200	4	8	0	0	0	-
5	6	300	2	8	0	0	0	-
6	7	200	2	8	0	0	0	-
8	9	200	4	8	0	0	0	-
10	11	200	2	8	0	0	0	-
11	12	300	2	8	0	0	0	-
12	13	200	2	8	0	0	0	-
14	15	200	2	8	0	0	0	-
15	16	300	2	8	0	0	0	-
16	17	200	2	8	0	0	0	-
18	19	200	2	8	0	0	0	-
19	20	300	8	8	1	0	0	-
20	21	200	8	8	1	0	0	-
1	8	200	4	8	0	0	0	-
2	5	100	4	8	0	0	0	-
3	6	100	0	8	0	0	0	-
4	7	100	8	8	1	0	0	-
5	9	100	4	8	0	0	0	-
8	10	100	4	8	0	0	0	-
9	11	100	2	8	0	0	0	-
6	12	200	0	8	0	0	0	-
7	13	200	8	8	1	0	0	-
10	14	200	4	8	0	0	0	-
11	15	200	2	8	0	0	0	-
12	16	200	0	8	0	0	0	-
13	17	200	8	8	1	0	0	-
14	18	100	4	8	0	0	0	-
15	19	100	0	8	0	0	0	-
16	20	100	0	8	0	0	0	-
17	21	100	8	8	1	0	0	-
1	1	0	-	-	0	0.4	-0.001	450
4	4	0	-	-	0	0.8	-0.015	900
7	7	0	-	-	0	0.3	-0.001	450
13	13	0	-	-	0	0.3	-0.001	450
15	15	0	-	-	0	0.4	-0.002	450
17	17	0	-	-	0	0.3	-0.001	450
18	18	0	-	-	0	0.8	-0.015	900
19	19	0	-	-	0	0.3	-0.001	450
20	20	0	-	-	0	0.3	-0.001	450
21	21	0	-	-	0	0.4	-0.002	900

\*全ての移動リンクには同等の属性値を持つ逆方向リンクが存在する。

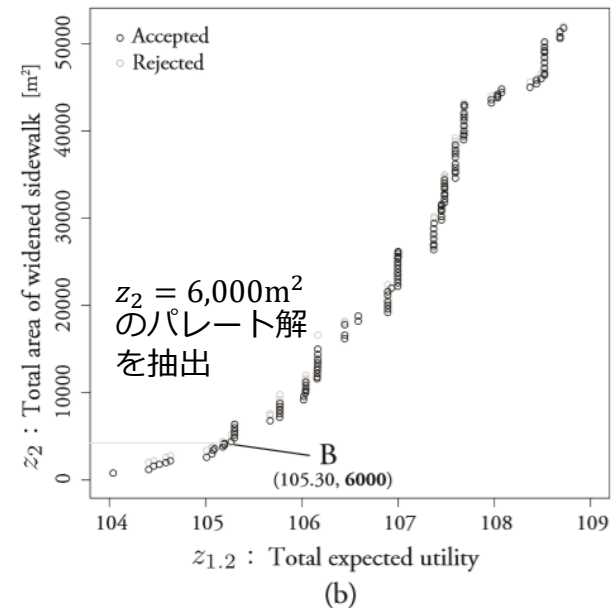
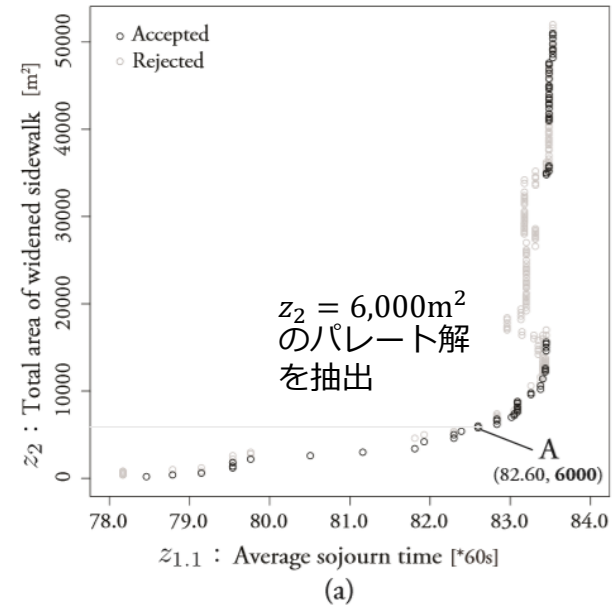
# 5. ケーススタディ

## 5.4 計算結果

- ネットワークの正規化定数  $L = \min l_a = 100\text{m}$
- 歩行速度  $v_m = 1.11\text{m/s}$ 、単位推移時間  $\tau = L/v_m = 90\text{s}$
- 時間制約(一定)  $T = 60, T \cdot \tau = 5,400\text{s} = 90\text{min}$
- パラメータ  $\theta = [-0.025, 0.10, 1.00, 1.00], \mu = 1, \beta = 1$
- $n_a = n_a^{\max} (\forall a \in A^m)$  を初期解
- 一様分布に基づくランダム選択により近傍構造を決定
- $\hat{n} = 1\text{m}$  ずつのネットワーク更新を  $N = 500$  回行った
- 下のOD交通量の表に基づき計算
- 右図で黒:採択されたパレート解、灰色:棄却された解

パレート解の集合であるフロンティアは、施策導入レベルに応じた最適ネットワーク・達成される目的関数値のバリエーションを示す

	$s_0$	$s_T$	$Q_{od}$
1	$(0, o_1)$	$(T, o_1)$	400
2	$(0, o_2)$	$(T, o_2)$	100
3	$(0, o_3)$	$(T, o_3)$	300
4	$(0, o_4)$	$(T, o_4)$	200



# 5. ケーススタディ

## 5.4 計算結果

**AB共通=拡幅されたリンクの多くが商店街に接続**  
 松山市駅周辺のリンク交通量・ノード滞在時間が増加

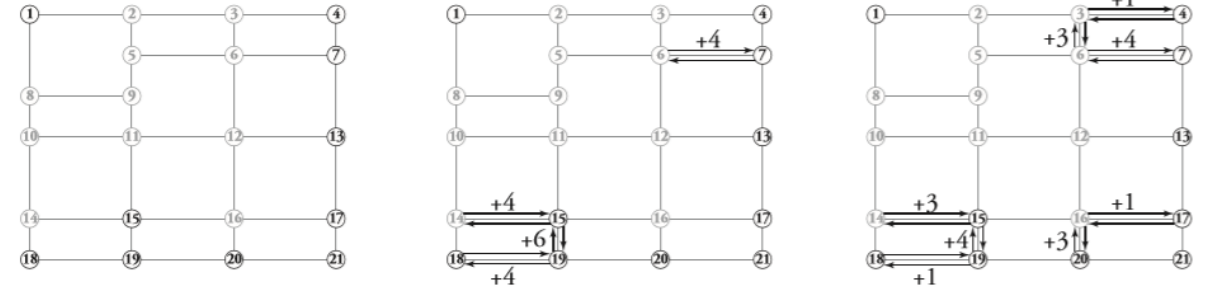
**A=特定の街路で集中的に拡幅**  
 各出発地から商店街、活動場所への接続などの活動パターンを強化し地区滞在時間を増加

**B=商店街を含むサイクル・ノードの形成・接続強化**  
 各出発地を含むサイクル形成、ネットワーク内部に歩行者の活動範囲を拡大させ利用者効用を増加

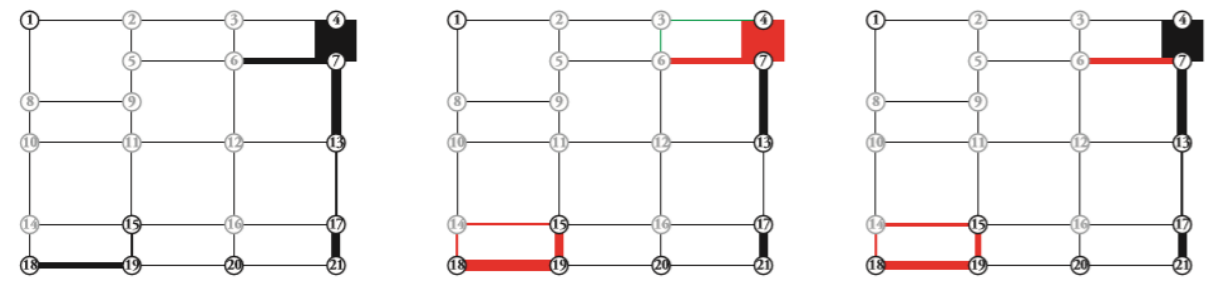
総拡幅面積が大きい時は大街道からネットワーク内部へ広範囲の接続強化で利用者効用増加が期待

花園町通りは拡幅の効果が認められず(滞在可能ノードなく移動コスト大) →距離のある活動場所間の移動・活動の増加には街路環境整備の他にアクティビティ挿入が必要

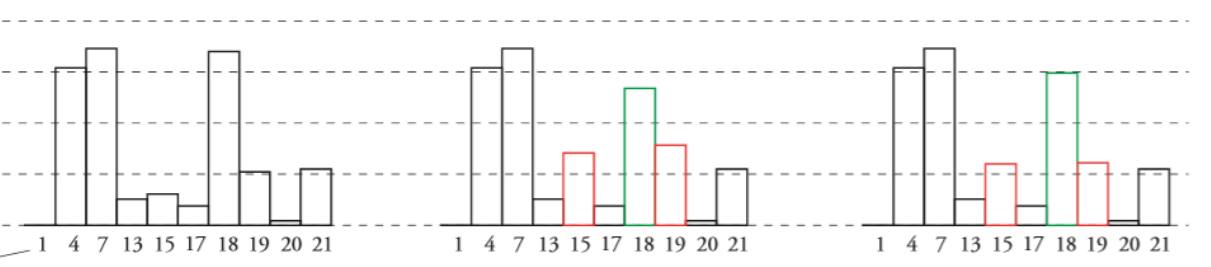
[Upper level problem]  
**Network (solution)**  
 +x : increased width [m]



[Lower level problem]  
**Link flow**  
 — : 100  
 — : 250  
 — : 500  
 — : 1000  
 — : diff. > +10  
 — : diff. < -10



**Activity duration**  
 [\*60sec./person]  
 — : diff. > +0.5  
 — : diff. < -0.5



Staying node number (1) Original network (2) Solution A (3) Solution B

滞在時間最大化

期待効用最大化

図7 拡幅リンクと活動配分結果。(1) 現状ネットワーク, (2) パレート解 A, (3) パレート解 B.



# 6. おわりに

## まとめ

- 歩行者の時間・空間利用への影響を明示的に考慮した歩道幅員決定問題
- 高解像度な時空間ネットワーク上の確率的な活動配分問題を記述した既往研究の大山・羽藤(2016)のモデルを活動ベースのネットワークデザイン問題へ展開
- 多目的最適化問題として定式化し、ネットワーク更新法で求解
- 松山市でのケーススタディを通じて、政策導入レベルに応じた目標達成値のバリエーションとしてのパレート解の集合を得た

## 本研究の価値と今後の課題

- 歩行者対象の公共政策では問題設定そのものが議論の対象
    - 1つの目的関数の明確な定義が難しい
    - トレードオフの関係にある複数の目的関数を考慮する必要も生じうる
- 様々な目的関数に対応できる多目的最適化手法の有用性は大きい
- 歩道幅員の拡幅とアクティビティの配置の関係について示唆を得た
  - 施設配置問題との同時決定や多様な説明変数の考慮が可能な枠組みへの展開が今後の課題