

マルチスケール行動モデル

2015.9.19 福山祥代

バルセロナ旧市街の広場

1980年代～
多孔質化による
都市再生プラン

既存の街路形状を保全
建物の一部を撤去し
広場を創出



地区内外の
人の流動化により
停滞した地区の
活性化を目指す

阿部(2006)



バルセロナ旧市街の広場

整備された広場の状況



1 駐車を原っぱに

目的のない場所
||
自発的な,多様な
活動の場所
を街に埋め込む
↓
活動の発生,
流動化を促す



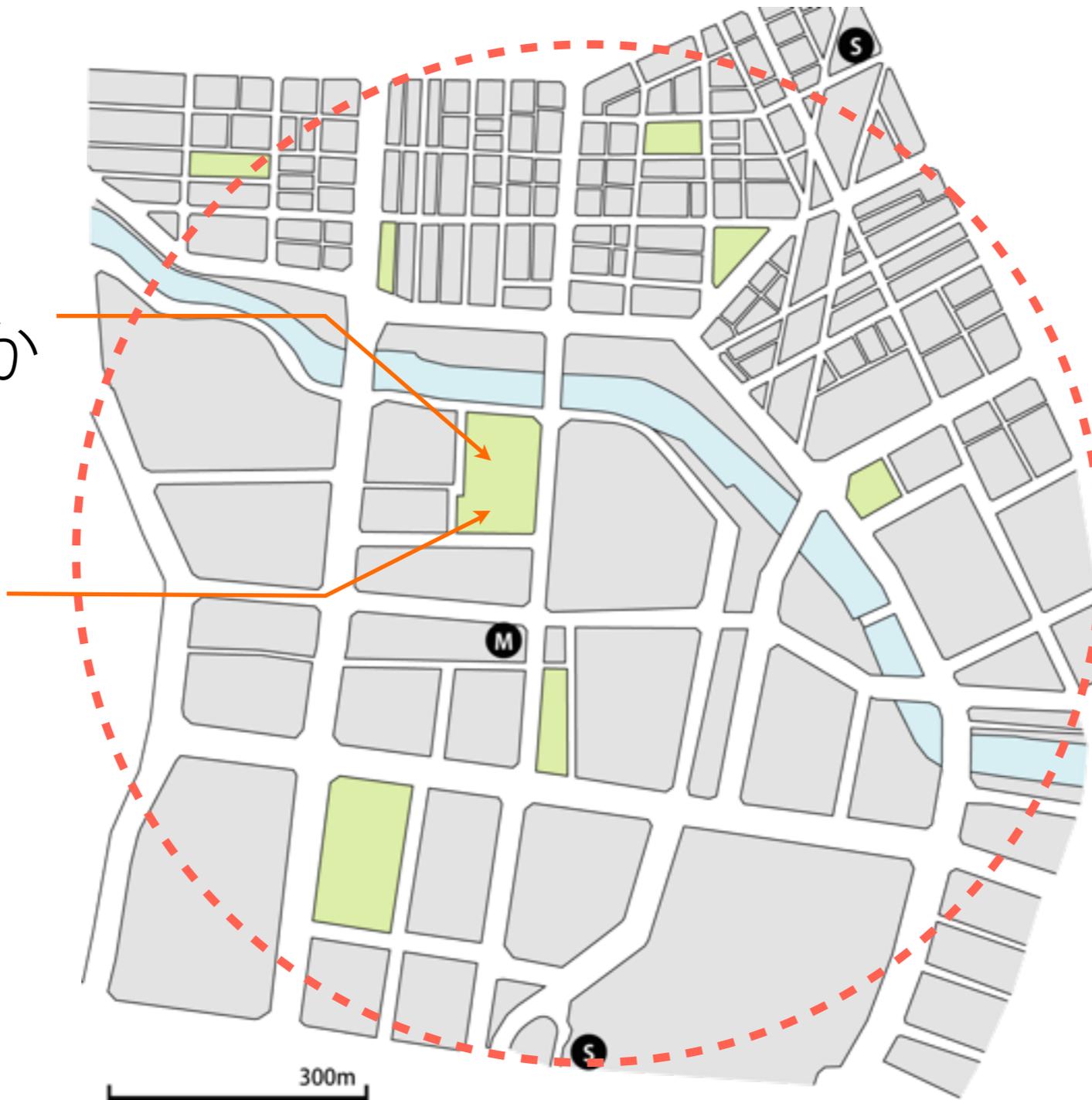
1kmスケールの都市計画

計画地のデザイン + 地区の流動・活動発生へのデザイン

課題

どのような空間にするか

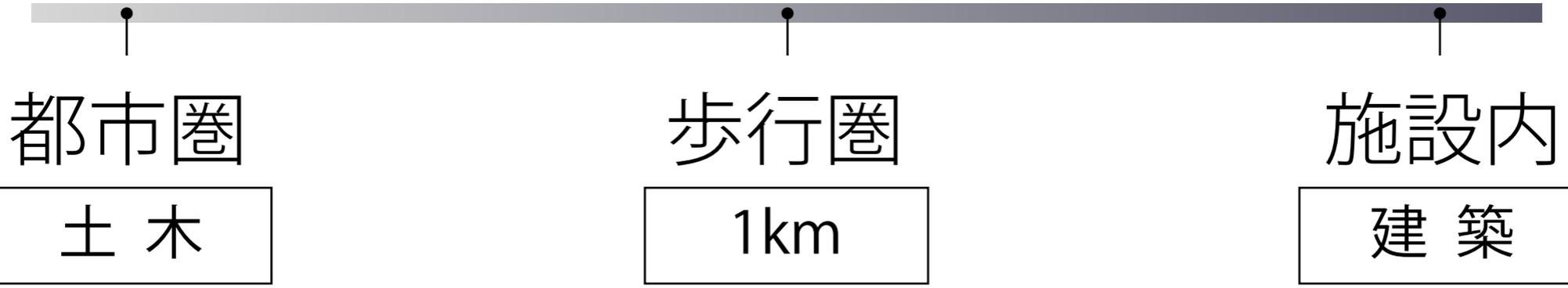
どこに配置するか



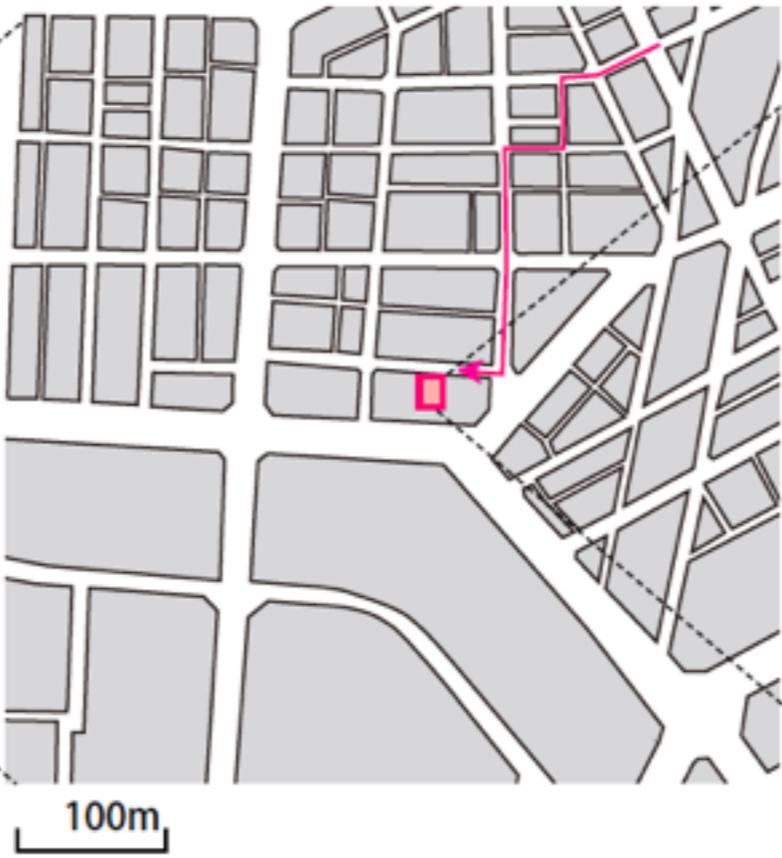
目的

地区一帯の流動化, 活動発生への促進

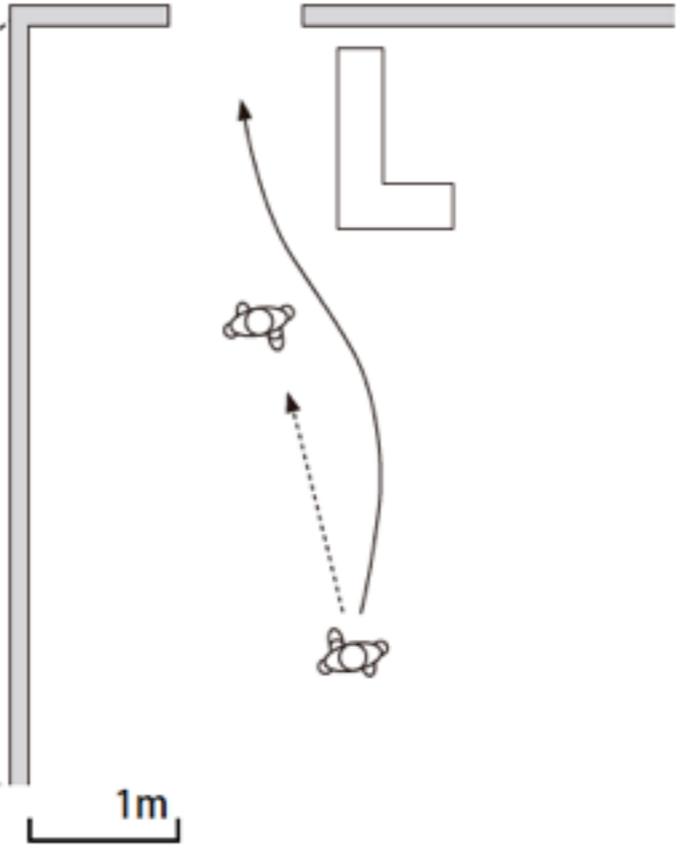
空間スケール



(a)都市圏

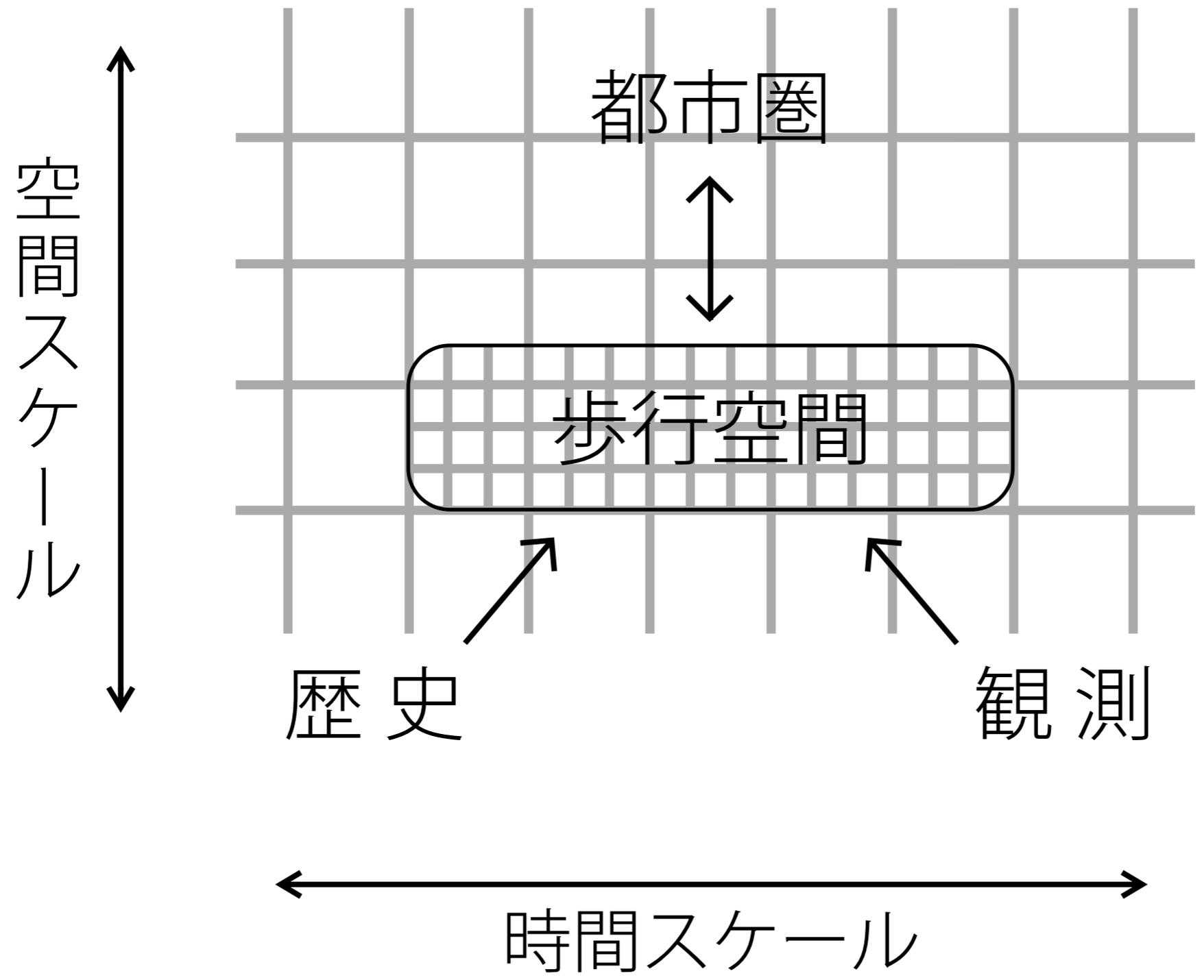


(b)歩行圏 (1kmスケール)



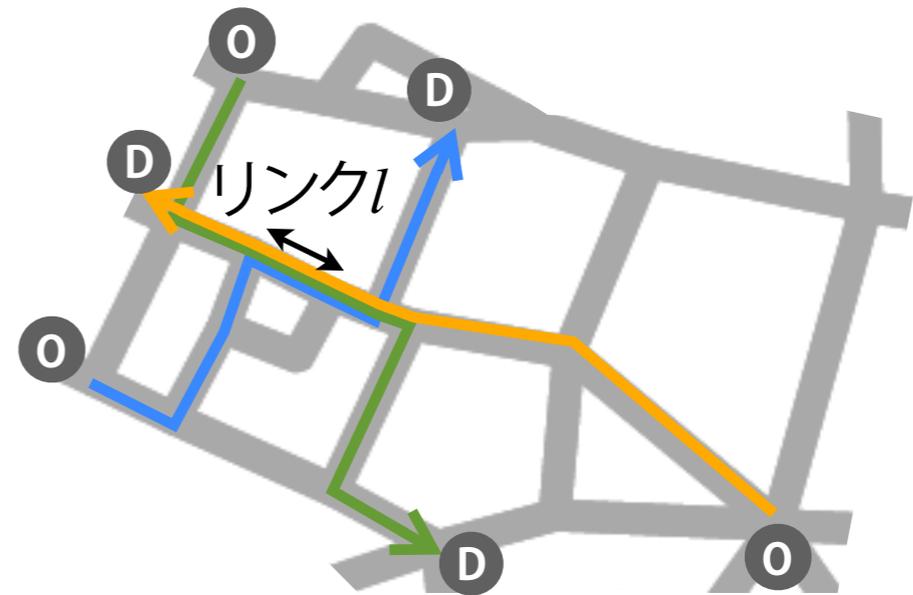
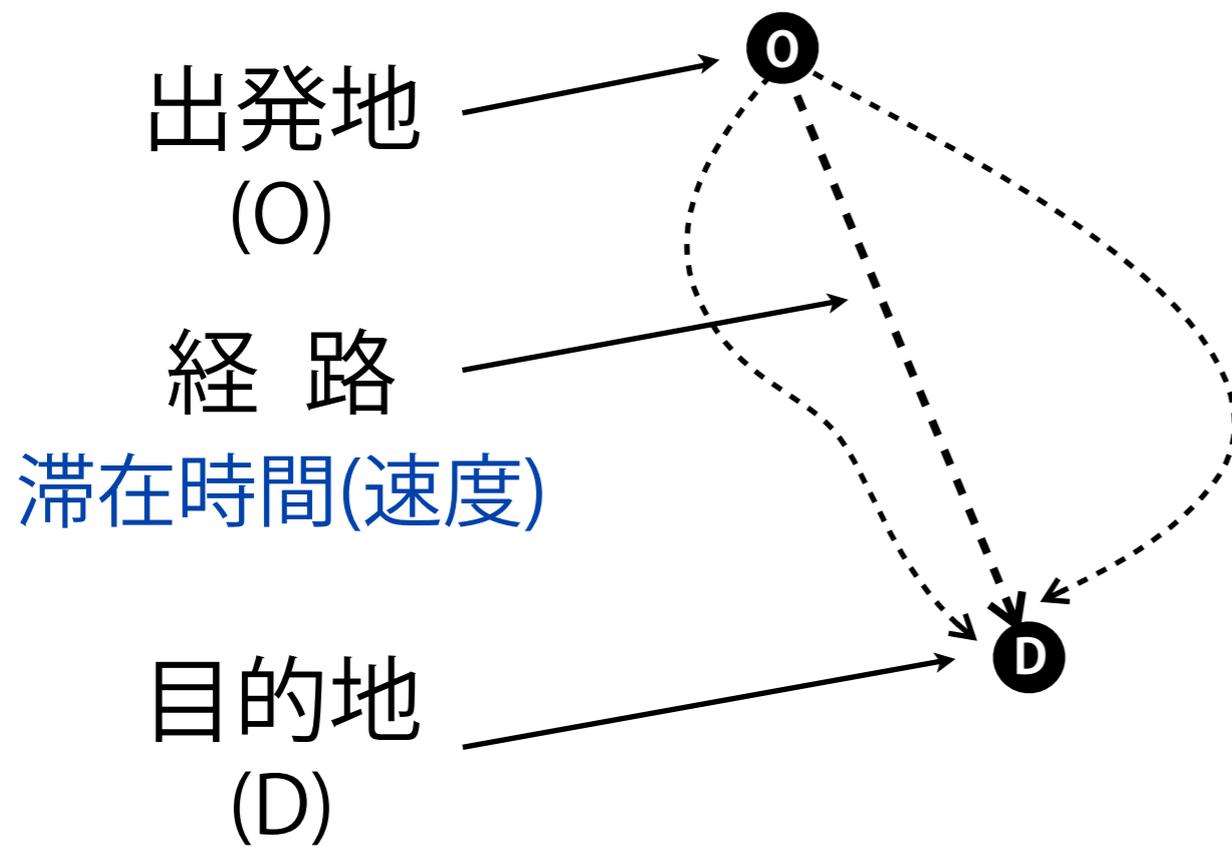
(c)施設内

ネットワーク上の空間計画



空間選択 → リンク交通量

歩行者の
フロー独立性を仮定



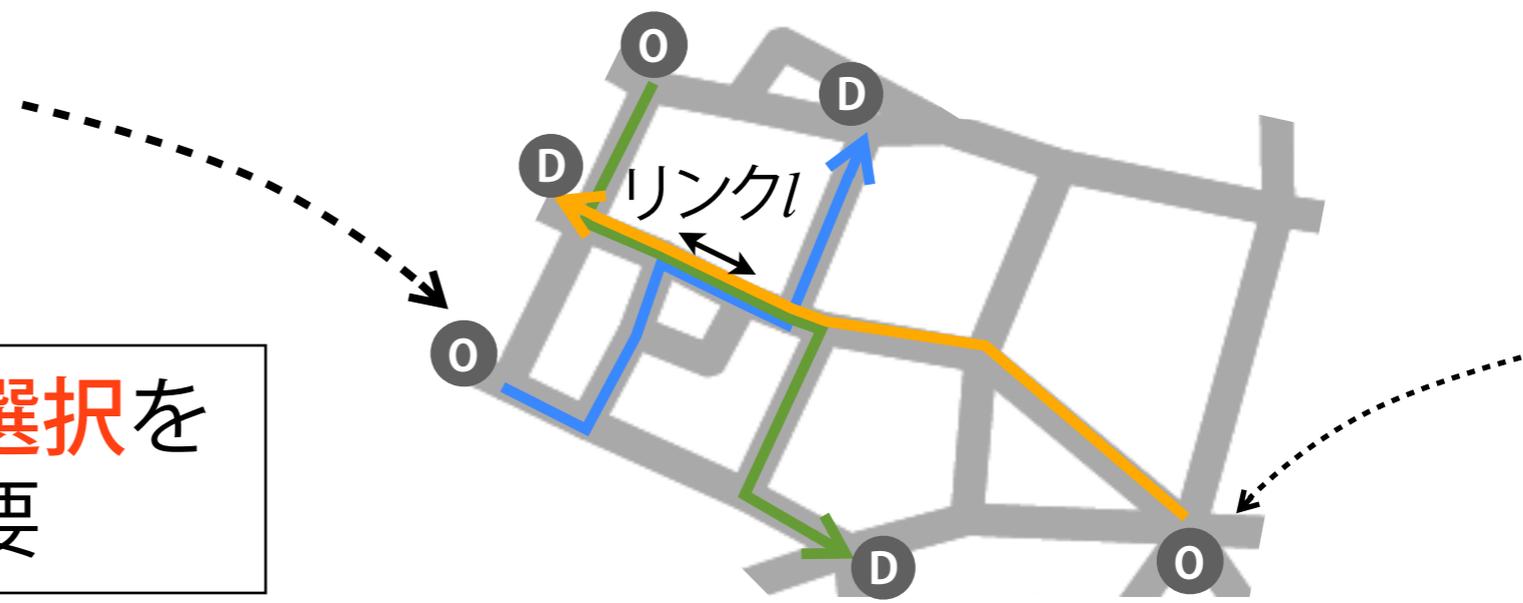
様々な歩行者の
OD間経路の重ね合わせ
+滞在時間

どこからどれぐらいの人が 地区に流入するのか

- 他の地区と比較してこの地区を
選択する人がどれぐらいいるのか
- どのような交通手段で
どこから入るのか

**都市圏スケールの行動選択を
考慮することが必要**

リンク交通量
に大きく影響

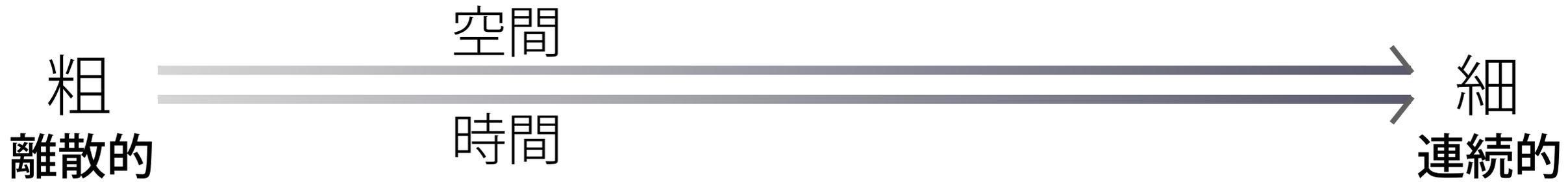


様々な歩行者の
OD間経路の重ね合わせ
+滞在時間

行動モデルの空間・時間単位

認知・判断

計算負荷



都市圏

土木

歩行圏

1km

施設内

建築

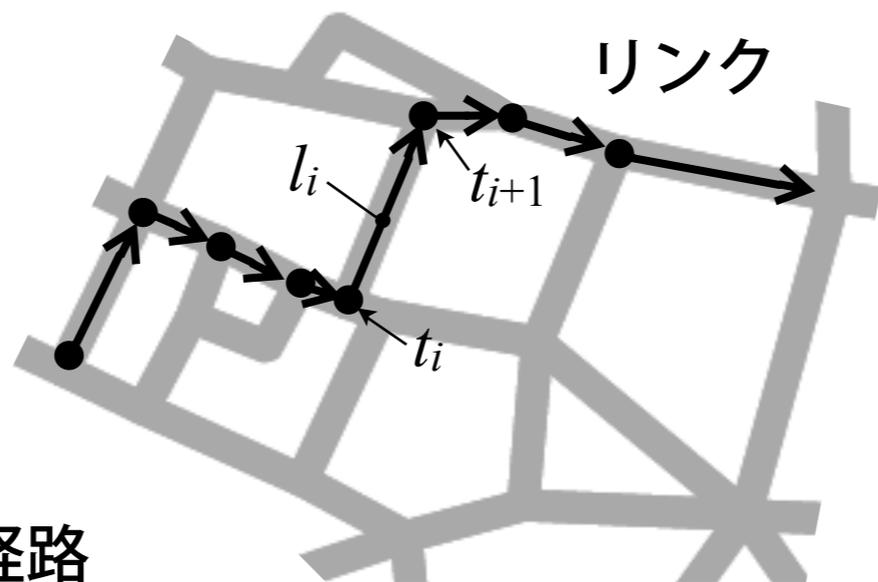
McFadden (1974)

$$U_{in} = \beta z_{in} + \varepsilon$$



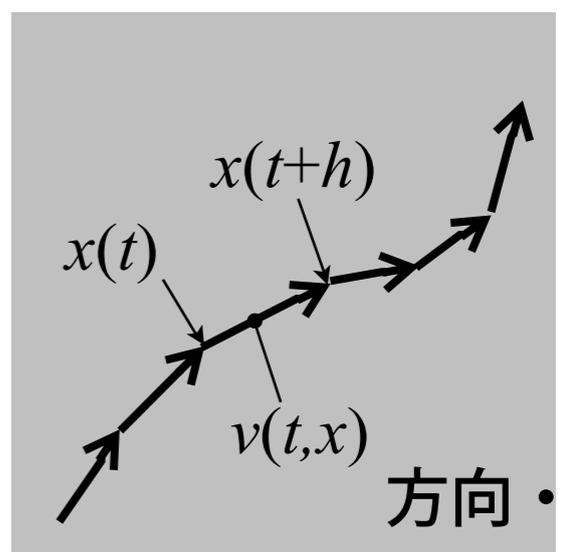
Fosgerau et al. (2013)

$$V_n^d(k) = E \left[\max_{a \in A(k)} (v_n(a|k) + V_n^d(a) + \mu \varepsilon_n(a)) \right]$$



Hoogendoorn and Bovy (2004)

$$W(t, \hat{x}) = E \left[\int_t^{t+h} L(\tau, x^*(\tau), v^*(\tau)) + W(t+h, x^*(t+h)) \right]$$



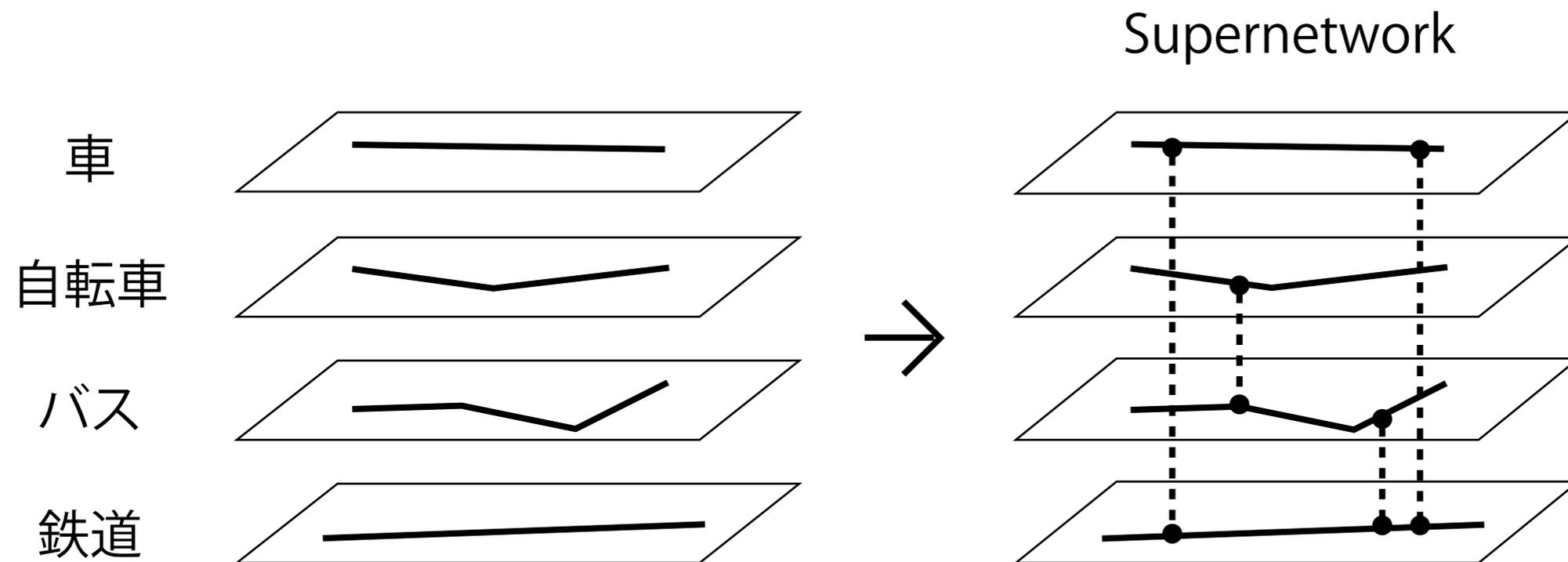
経路

方向・速度

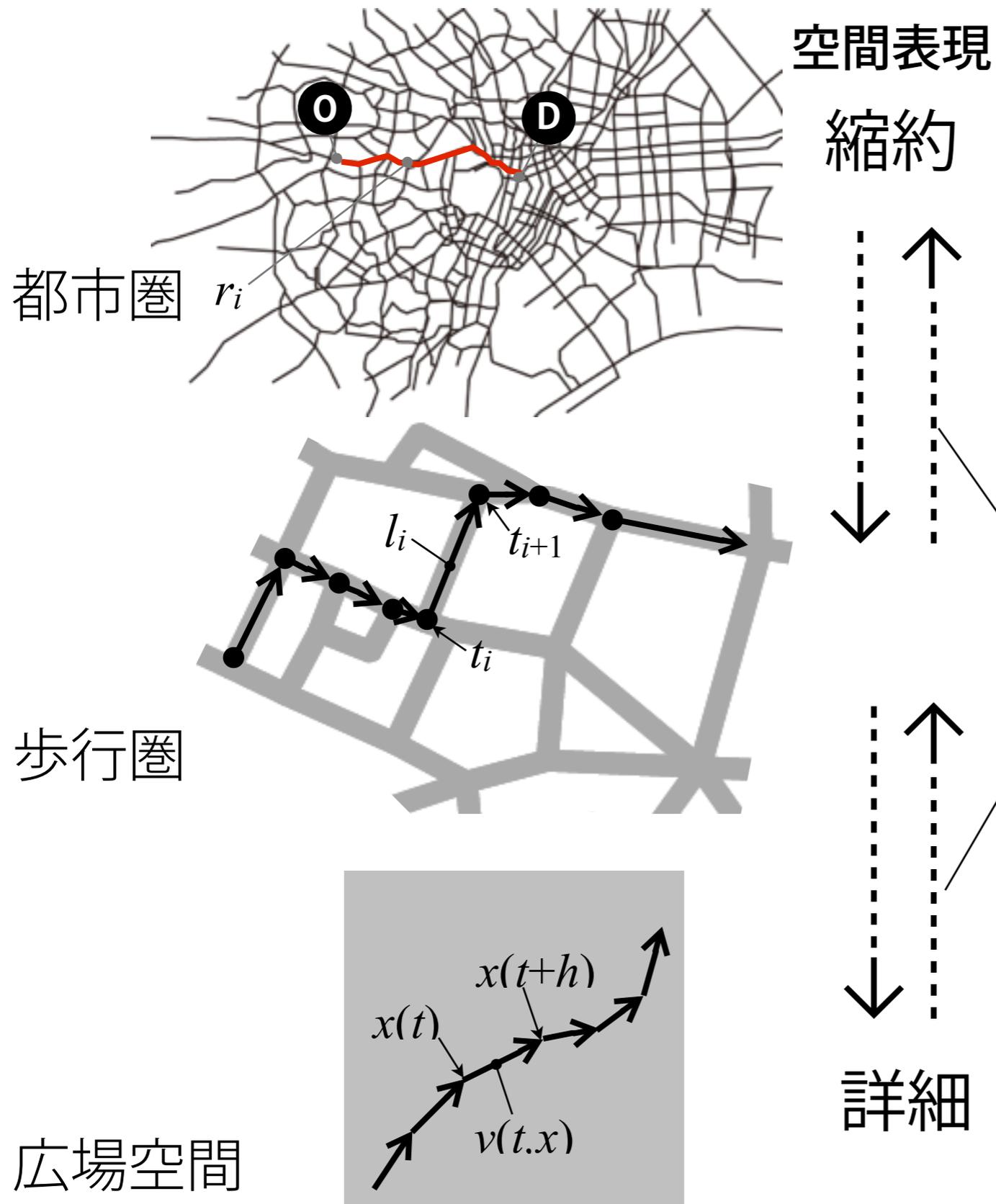
異なる手段の接続：

Supernetwork
Sheffi(1985)

交通手段選択, 乗換を含むネットワーク表現



マルチスケール分析



認知・判断

計算

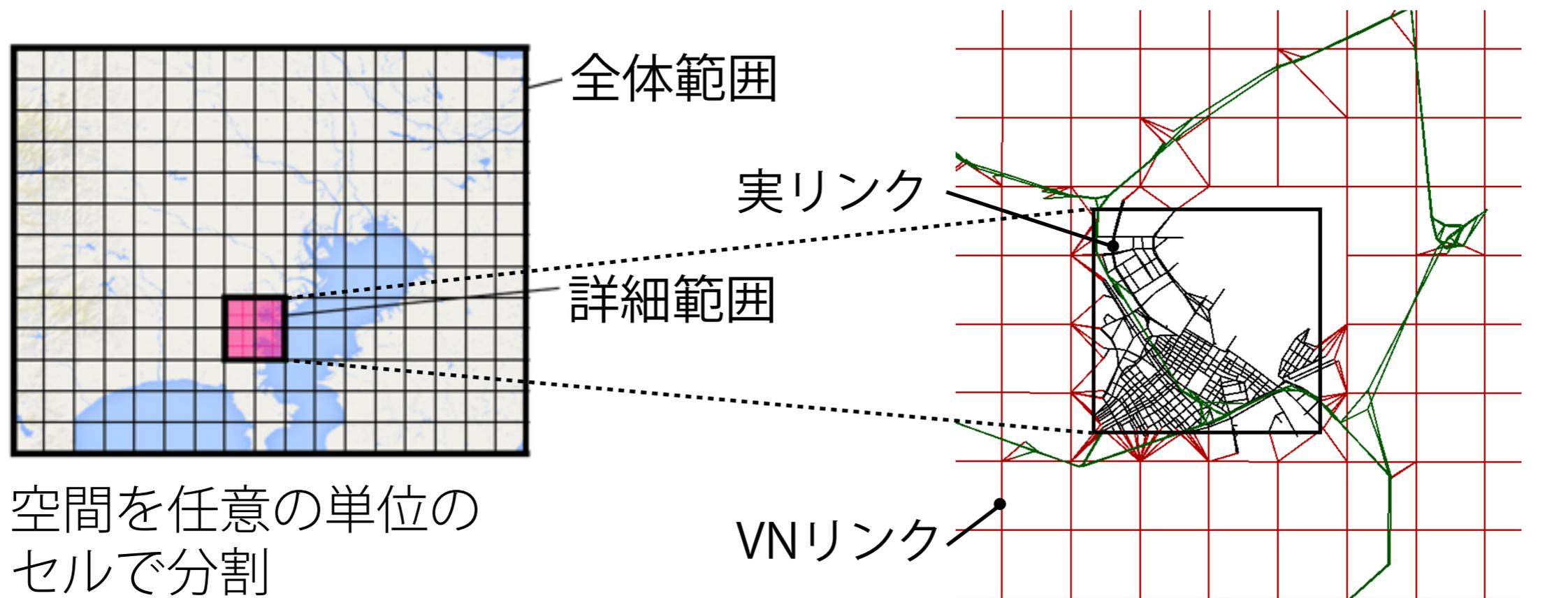
すべての選択肢の比較検討
: 非現実的

異なるスケールの接続:
情報の圧縮

詳細

Virtual Network(VN) を用いた
マルチスケール分析

伊藤 (2013)

空間を任意の単位の
セルで分割

VNリンク

詳細範囲： 実リンク

全体範囲： セル間を結ぶリンク
で縮約(VN)

課題：

- 粗いスケールのデータを
細かいスケールに繰り込む際の誤差の取り扱い
- スケールの接続処理における変数の集計量の近似方法

1kmスケールの行動

活動人数

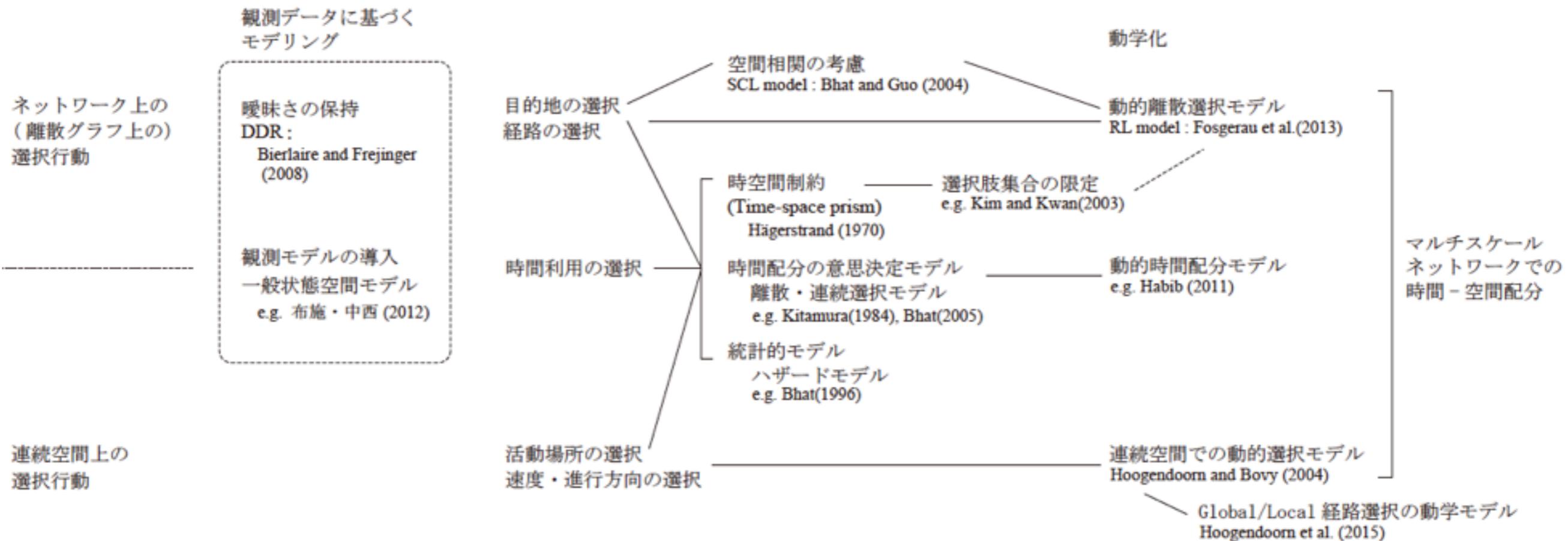
滞在時間



休憩, 散策, 待ち合わせ, 立ち話, 時間調整, 情報検索, 食事, ...

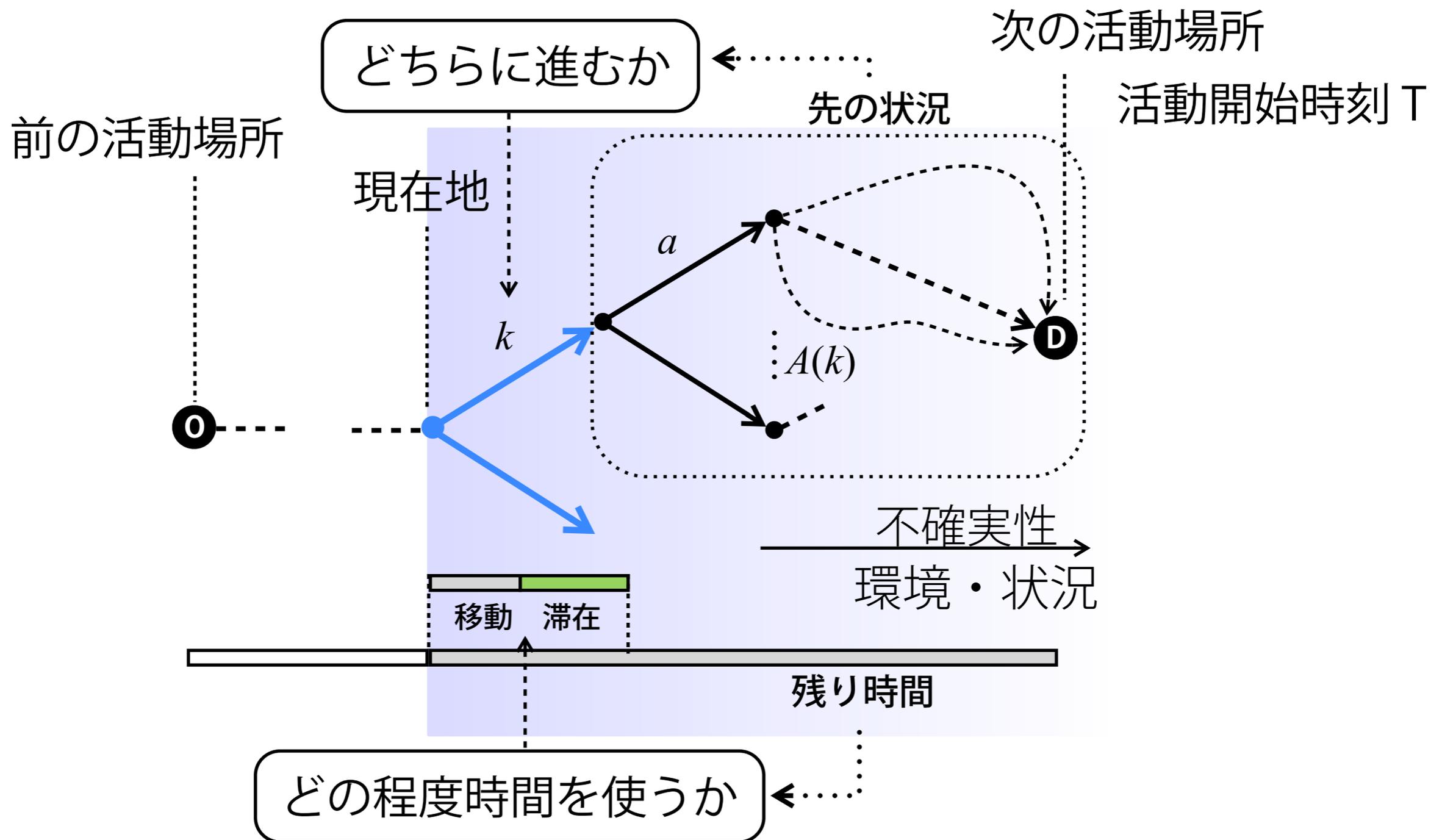
環境や状況に対応した
微視的・逐次的な時空間選択

1kmスケールの歩行者行動モデリング



ネットワーク上の動的選択モデル

街路空間での行動



ネットワーク上の動的選択モデル

将来の効用も考慮して直近の選択を行うモデル

Hoogendoorn and Bovy (2004), Fosgerau et al. (2013)

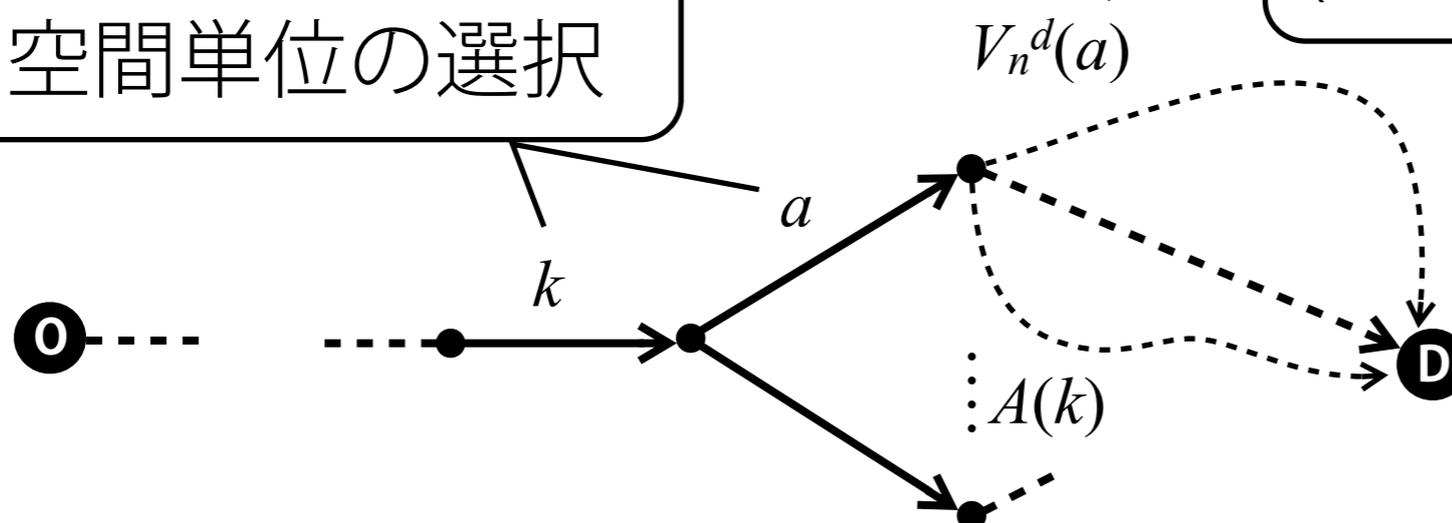
Bellmanの最適性原理(Bellman,1957)より

$$\underbrace{V_n^d(k)}_{\text{リンク}k\text{の価値関数}} = E \left[\max_{a \in A(k)} \underbrace{(v_n(a|k))}_{a\text{の効用}} + \underbrace{V_n^d(a)}_{a\text{の価値関数}} + \mu \varepsilon_n(a) \right]$$

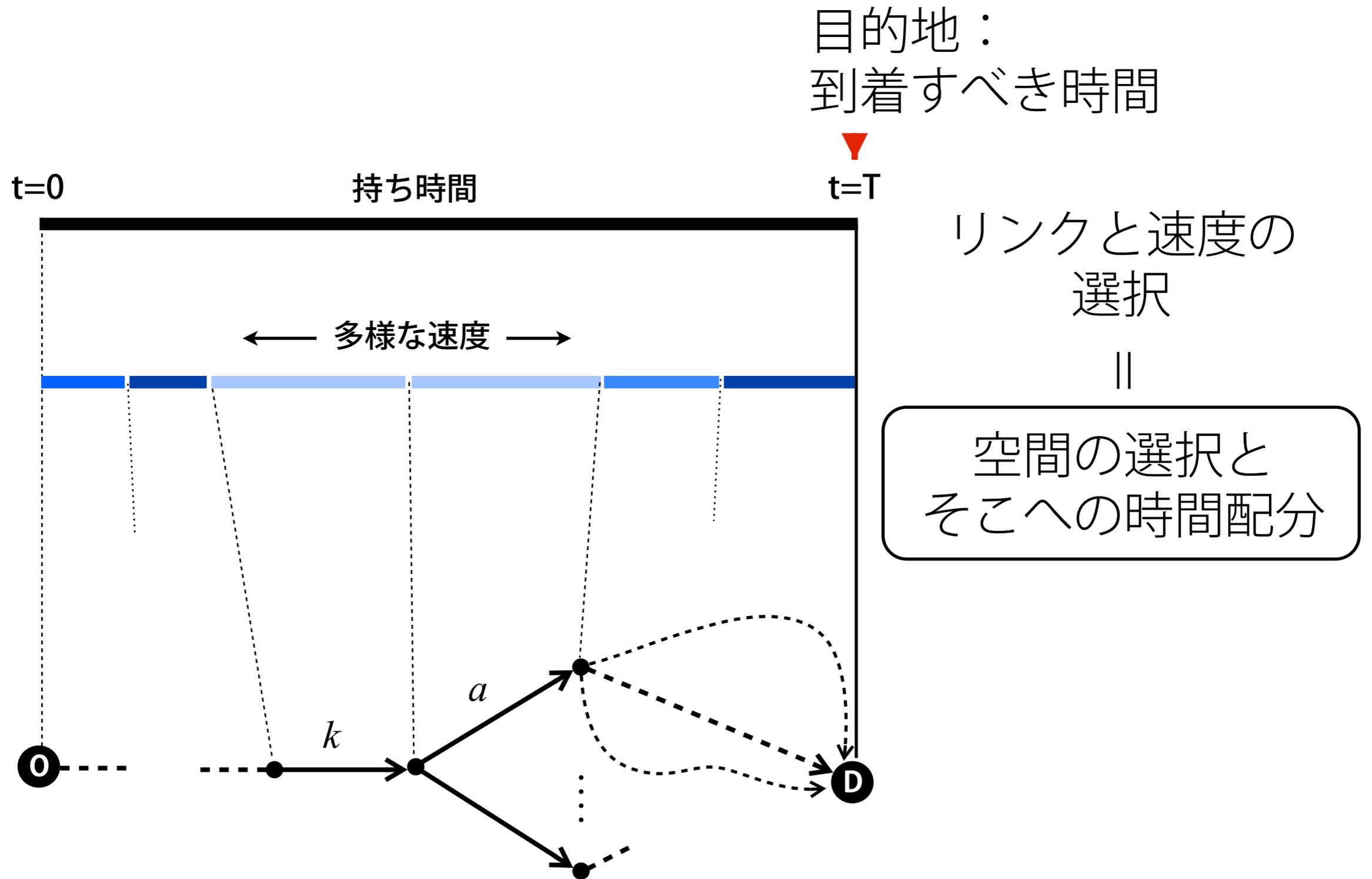
再帰的

微視的な
空間単位の選択

目的地までの状態
(経路, 所要時間等)を先読み



ネットワーク上の動的選択モデル



4

建築スケールの歩行者モデル

Hoogendoorn and Bovy (2004)

2次元連続平面上の経路・活動場所選択モデル

経路：velocity path によって決まる連続関数

$$x(\cdot) := \{x(\tau) \in \Omega \mid t_0 \leq \tau \leq t_1 \text{ s.t. } \dot{x}(\tau) = v(\tau) \text{ and } x(t_0) = x_0\}$$

歩行者は期待不効用関数を最小にする

活動スケジュール $S = \{i\}$, 活動時刻 T_i , 経路 v を選択

$$C(S, \{T_i\}_{i \in S}, v(\cdot) \mid t_0, x_0) := \sum_{i \in S} \underbrace{C_i(T_i, v(\cdot) \mid T_{i-1}, x(T_{i-1}))}_{\text{活動スケジュールのコスト (活動順に制限がある場合に適用)}} + \underbrace{\psi(S)}_{\text{活動スケジュールのコスト (活動順に制限がある場合に適用)}}$$

活動スケジュールのコスト
(活動順に制限がある場合に適用)

活動場所 $x(T_{i-1}) \in A_{i-1j}$ から $x(T_i) \in A_{ij}$ までの移動コスト
+ 活動場所 A_{ij} での活動による効用

Hoogendoorn and Bovy (2004)

歩行者の移動

pedestrian's internal state prediction model

$$dx = vdt + \sigma dw \quad \text{subject to } x(t) = \hat{x}$$

$\sigma = \sigma(x, v)$ the way white noise affects the location
 white noise
 uncertainty in the expected traffic conditions

restriction of velocity

$$v \in V_a(t, x) \quad \text{where } V_a(t, x) = \{v \text{ such that } \|v\| \leq v_0(t, x)\} \subset \mathbb{R}^2$$

by physical limitation, the presence of other pedestrians

Hoogendoorn and Bovy (2004)

移動コスト

$$C_i(T_i, v_{[t, T_i]} | T_{i-1}, x(T_{i-1})) := E \left[\underbrace{\int_t^{T_i} L(\tau, x(\tau), v(\tau)) d\tau}_{\text{running cost}} + \underbrace{\phi(T_i, x(T_i))}_{\text{terminal cost}} \right]$$

terminal cost

$$\phi(T_i, x(T_i)) = \begin{cases} -U_{ij}(T_i) & x(T_i) \in A_{ij} \quad T_i < t_1 \\ \phi_i & x(T_i) \notin \cup_j A_{ij} \quad T_i = t_1 \end{cases}$$

時間内に活動場所 A_{ij} に到着した場合の活動場所の効用

時間内に活動場所 A_{ij} に到着しなかった場合のペナルティ

running cost

- 予想旅行時間
- 障害物や壁への接近による不快
- 適切な歩行速度での歩行
- 他の歩行者との干渉
- 環境による刺激

Hoogendoorn and Bovy (2004)

移動コストを最小化する速度を選択

$$v_{[t, T_i]}^* = \arg \min C_i(t, \hat{x}; v_{[t, T_i]}, \{A_{ij}\}) = \arg \min E \left[\int_t^{T_i} L(\tau, x(\tau), v(\tau)) d\tau + \phi(T_i, x(T_i)) \right]$$

価値関数

$$W(t, \hat{x}) := E \left[\int_t^{T_i} L(\tau, x^*(\tau), v^*(\tau)) + \phi(T_i, x^*(T_i)) \right]$$

subject to

$$dx^* = v^* dt + \sigma(x^*, v^*) dw \quad \text{subject to } x^*(t) = \hat{x}$$

微小時間 h を考えると,

Bellmanの最適性原理(Bellman, 1957)より

$$W(t, \hat{x}) = E \left[\int_t^{t+h} L(\tau, x^*(\tau), v^*(\tau)) + W(t+h, x^*(t+h)) \right]$$

Hoogendoorn and Bovy (2004)

ここで,

$$E \left[\int_t^{t+h} L(\tau, x(\tau), v(\tau)) \right] = L(t, x(t), v(t))h + O(h^2)$$

$$E[W(t+h, x(t+h))] = W(t+h, \hat{x} + hv) + \frac{h}{2} \sum_{ij} \Theta_{ij}(x, v) \frac{\partial^2 W(t, \hat{x})}{\partial x_i \partial x_j} + O(h^{3/2})$$

$$\Theta(x, v) := \sigma(x, v)\sigma'(x, v)$$

以上を価値関数の式に代入して $h \rightarrow 0$ とすると

Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程式

$$-\frac{\partial}{\partial t} W(t, x) = H(t, x, \nabla W, \Delta W)$$

終局条件 $W(t_1, x) = \phi_i$

境界条件 $W(T_i, x) = -U_{ij}(T_i)$ for $x \in A_{ij}$ and $T_i < t_1$

$$H(t, x, \nabla W, \Delta W) := \min_{v \in V_a(t, x)} \left\{ L(t, x, v) + \sum_i v_i \frac{\partial W}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \sum_{ij} \Theta_{ij}(x, v) \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial x_j} \right\}$$

Hoogendoorn and Bovy (2004)

最適速度・進行方向

$$v^*(t, x) = \arg \min \left\{ L(t, x, v) + \sum_i v_i \frac{\partial W}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \sum_{ij} \Theta_{ij}(x, v) \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial x_j} \right\}$$

subject to $v^*(t, x) \in V_a(t, x)$

$$v^*(t, x) = V^*(t, x) e^*(t, x)$$

最適速度

$$V^*(t, x) := \min \{ c_3^{-1} \|\nabla W\|, v_0(t, x) \}$$

限界コスト

最適進行方向

$$e^*(t, x) := -\nabla W / \|\nabla W\|$$

最適コストが最も速く減少する方向に進む

Hoogendoorn and Bovy (2004)

$$-\frac{\partial}{\partial t} W(t, x) = H(t, x, \nabla W, \Delta W) \quad (1) \quad \text{の数値的解法}$$

対象空間を微小セル $\delta \times \delta$ に分割, 時間を微小時間 h に分割 (離散化)

(1) の偏微分をfinite differenceに置き換える

$$\Delta_{x_i}^{\pm} W := \delta^{-1} [W(t, x \pm \delta u_i) - W(t, x)] \quad \text{for } i = 1, 2$$

$\Delta_{x_i}^{+} W$:forward finite difference $\Delta_{x_i}^{-} W$:backward finite difference

$$\Delta_{x_i}^2 W := \delta^{-2} [W(t, x + \delta u_i) - 2W(t, x) + W(t, x - \delta u_i)] \quad \text{for } i = 1, 2$$

$$\Delta_{x_i x_j}^{\pm} W := \pm \frac{1}{2} \delta^{-2} [W(t, x + \delta(u_i \pm u_j)) + 2W(t, x) + W(t, x - \delta(u_i \pm u_j)_i)]$$

$$\mp \frac{1}{2} \delta^{-2} [W(t, x + \delta u_i) + W(t, x + \delta u_j) + W(t, x - \delta u_i) + W(t, x - \delta u_j)]$$

(1) の数値的近似式 (Fleming and Soner, 1993)

$$W(t - h, x) = W(t, x) - hH(x, \Delta_{x_i}^{\pm} W, \Delta_{x_i}^2 W, \Delta_{x_i x_j}^{\pm} W)$$

$$H(x, \Delta_{x_i}^{\pm} W, \Delta_{x_i}^2 W, \Delta_{x_i x_j}^{\pm} W) = \min_{v \in V_a(t, x)} \left\{ L(t, x, v) + \sum_i (v_i^{+} \Delta_{x_i}^{+} W - v_i^{-} \Delta_{x_i}^{-} W) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sum_i \Theta_{ii}(x, v) \Delta_{x_i}^2 W + \frac{1}{2} \sum_i (\Theta_{ij}^{+}(x, v) \Delta_{x_i x_j}^{+} W - \Theta_{ij}^{-}(x, v) \Delta_{x_i x_j}^{-} W) \right\}$$

Hoogendoorn and Bovy (2004)

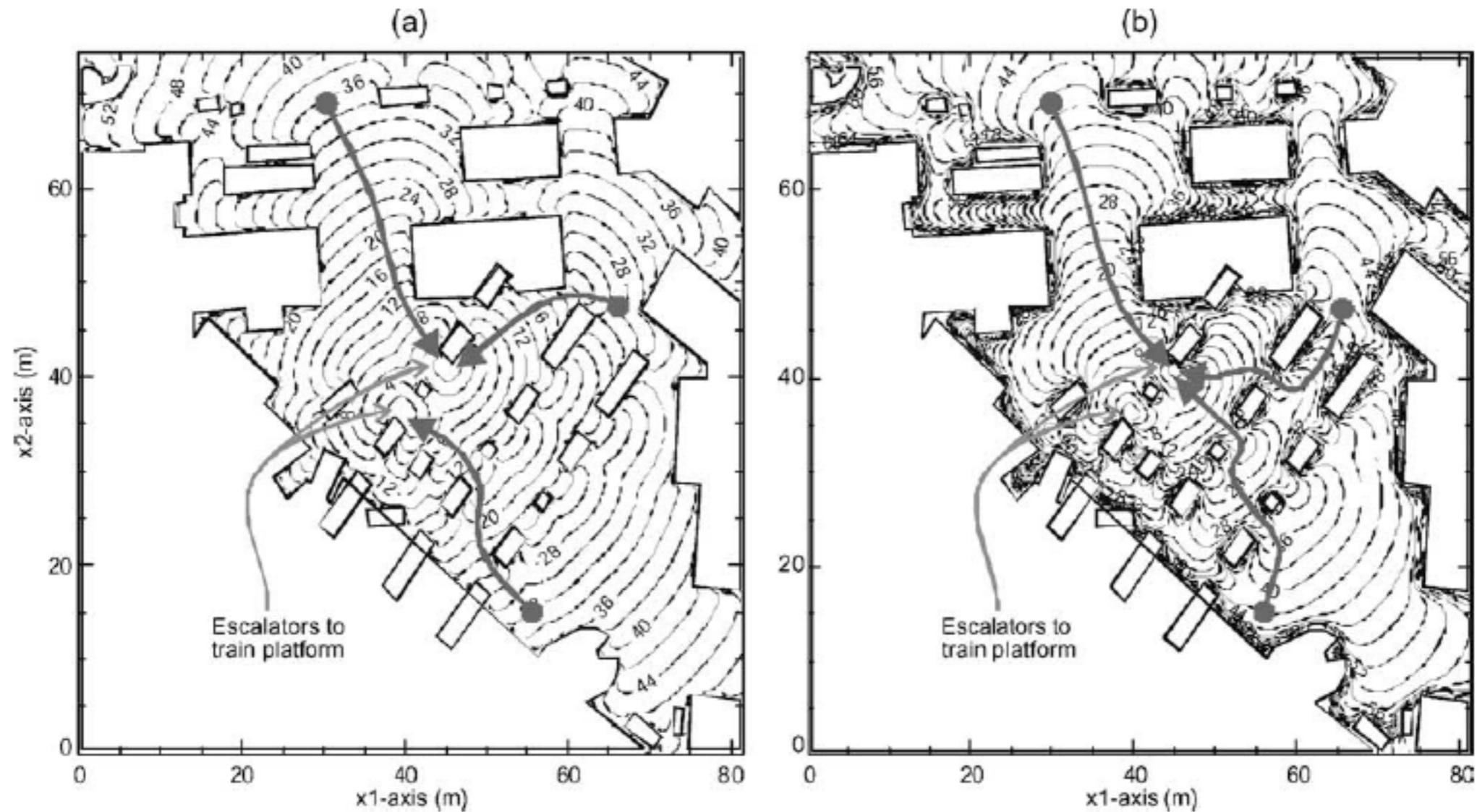


Fig. 4. Expected minimum perceived disutility functions for leaving Schiphol Plaza via escalators for uncertainty levels (a) $\sigma_0 = 0.01$ and (b) $\sigma_0 = 0.25$. Optimal paths are perpendicular to iso-expected minimum perceived disutility function curves.

iso-expected minimum perceived disutility function curves

Hoogendoorn and Bovy (2004b)

ネットワーク配分モデル

$$-\frac{\partial \tilde{W}_j}{\partial t} = H(t, x, \nabla \tilde{W}_j) \text{ s.t. } \tilde{W}_j(t_1, x) = \phi_0 \quad \text{and} \quad \tilde{W}_j(T, x) = -U_j(T) \quad \text{for } x \in D_j, \\ T < t_1$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}_j(t, x) + \nabla(\tilde{\rho}_j(t, x)v_j^*(t, x)) = s_j(t, x) - r_j(t, x)$$

ここで,

$$H(t, x, \nabla \tilde{W}_j) := L(t, x, v^*) + v^*(t, x) \cdot \nabla \tilde{W}_j$$

$$v^*(t, x) = \operatorname{argmin}\{L(t, x, v) + v \cdot \nabla \tilde{W}_j \mid \text{subject to } v \in \Gamma(t, x)\}$$

Hoogendoorn and Bovy (2004b)

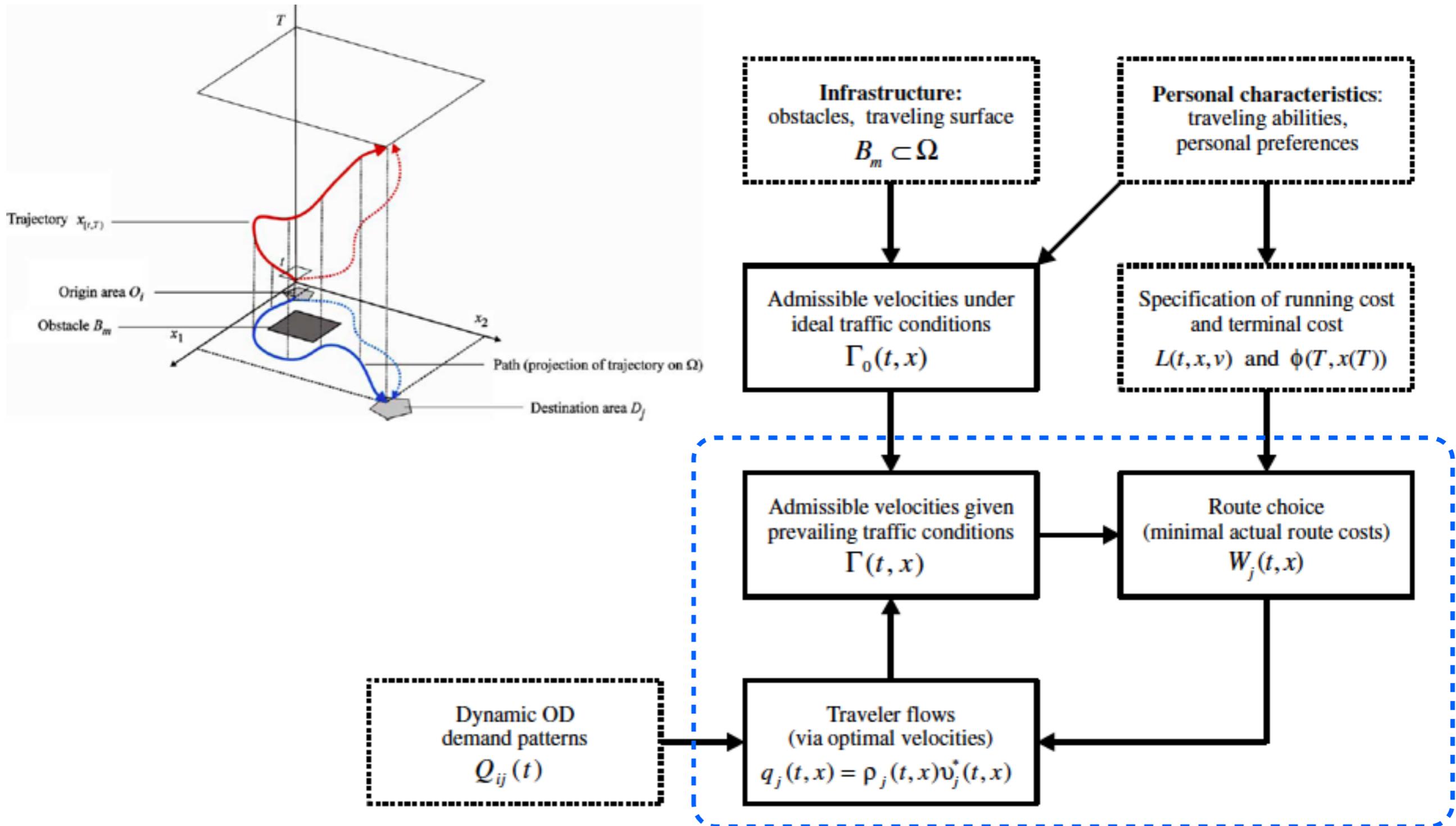


Fig. 5. Framework of the dynamic assignment model in continuous space.

Hoogendoorn and Bovy (2004b)

Heuristic approach to continuous dynamic assignment

1. Initialization

自由流状態を仮定(密度0, 速度最大)

2. Assignment

価値関数 $W_j^{(k-1)}(t, x)$ に基づく最適経路を決定

すべての t, x に対して補助密度 $\hat{\rho}_j^{(k-1)}(t, x)$ を計算

コスト関数 $W_j^{(k-1)}(t, x)$ に基づき all-or-nothing assignment

$\rho_j^{(k)}(t, x) := (1 - \lambda)\rho_j^{(k-1)}(t, x) + \lambda\hat{\rho}_j^{(k-1)}(t, x)$ に基づき密度を更新

3. Compute speed reduction factors

密度に基づき速度低下要因を計算: $\alpha(t, x) = \alpha^e(\rho^{(k)}(t, x))$

$\Gamma(t, x) = \{\alpha(t, x)v_0(t, x) | \alpha(t, x) = \alpha^e(\rho(t, x)) \forall v_0(t, x) \in \Gamma_0(t, x)\}$ により許容速度を更新

4. Determine route-choice

Hoogendoorn and Bovy (2004) の方法で $\Gamma^{(k)}(t, x)$ から $W_j^{(k)}(t, x)$ を算出

5. Iterate

as long as $|\rho_j^{(k)}(t, x) - \rho_j^{(k-1)}(t, x)| > \delta$ for some very small value $0 < \delta \leq \lambda$.

Hoogendoorn and Bovy (2015)

Global value function : from Hoogendoorn and Bovy (2004)

$$\phi_d(t, \vec{x}) = \min_{\vec{v}_{[t,T]}} E \left\{ \int_t^T L(s, \vec{x}(s), \vec{v}(s)) ds + \theta_d(T, \vec{x}(T)) \right\}$$

- 計算負荷が大きい
- 先の密度をすべて予測できるとする仮定が非現実的

Local route choice の導入

Local value function :

$$\phi_d = \underbrace{\varphi_d^{\text{crowdedness}}}_{\text{混雑を回避する経路を選ぶ}} + \alpha_d \cdot \underbrace{\varphi_d^{\text{delay}}}_{\text{混雑による速度低下}}$$

混雑を回避する経路を選ぶ

混雑による速度低下

$$\varphi_d = \sum_{\delta=1}^D \beta_{\delta} \rho_{\delta}$$

$$\varphi_d^{\text{delay}} = \lambda_d(\tilde{\rho})$$

$$\tilde{\rho} = \sum_{\delta=1}^D \eta_{\delta} \cdot \rho_{\delta}$$

$$\lambda_d(\rho_1, \dots, \rho_D) dt = \left(\frac{1}{\tilde{U}(\rho_1, \dots, \rho_D)} - \frac{1}{\tilde{U}(0)} \right) dt$$

歩行速度

Route choice

$$\vec{\gamma}_d = - \frac{\nabla \omega_d}{\|\nabla \omega_d\|} = - \frac{\nabla \phi_d + \nabla \varphi_d}{\|\nabla \phi_d + \nabla \varphi_d\|}$$

global route choice → desired velocity

influenced by local route choice

→ プレトリップの経路選択とみなし出発前に計算