

**Paz, A., Peeta, S.:**  
**Behavior-consistent real-time traffic routing**  
**under information provision,**  
**Transportation Research Part C, Vol. 17,**  
**pp. 642-661, 2009.**

BinN理論談話会第3回

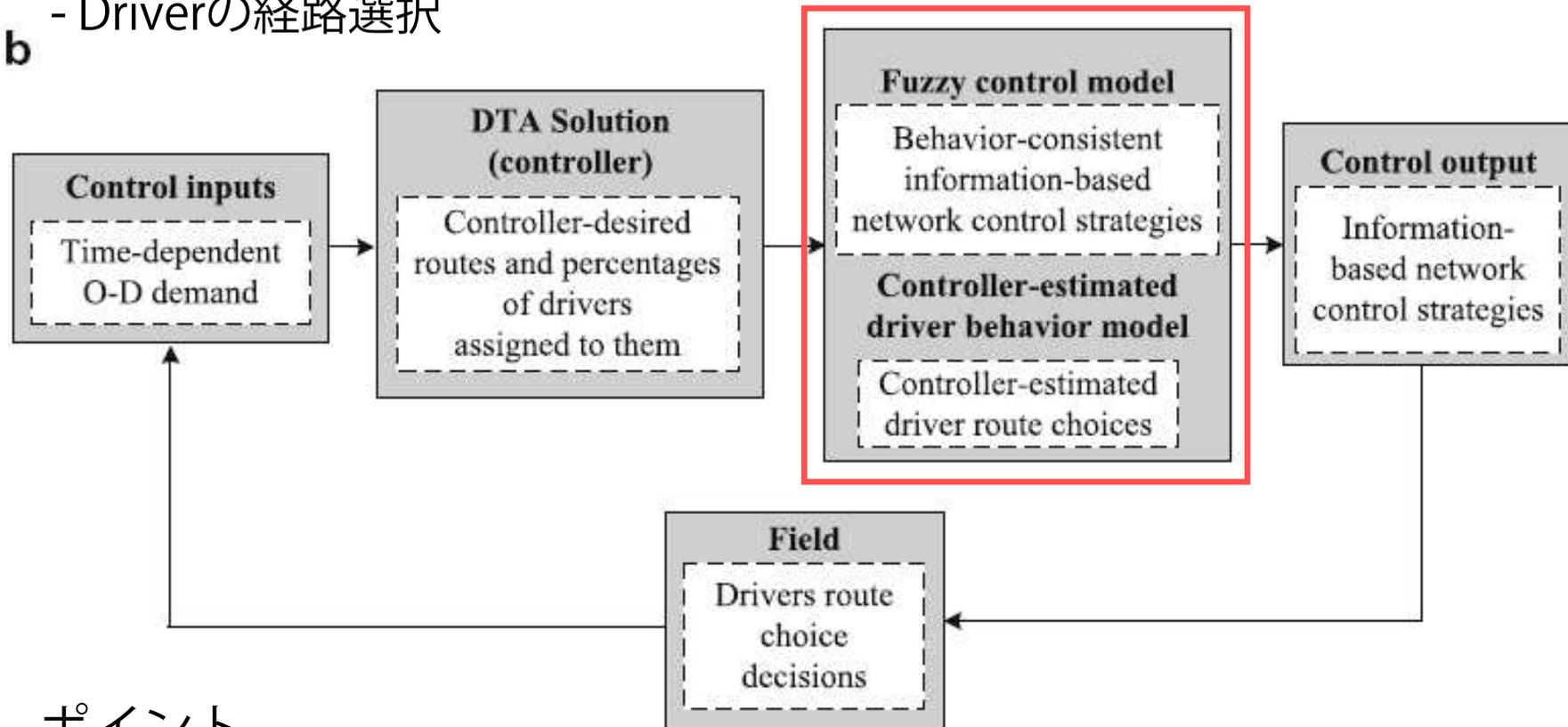
2014/4/25(土)

浦田 淳司

# Behavior – consistent approach

- 二段階の意思決定
  - Controllerの(ネットワーク最適化のための)情報戦略
  - Driverの経路選択

b



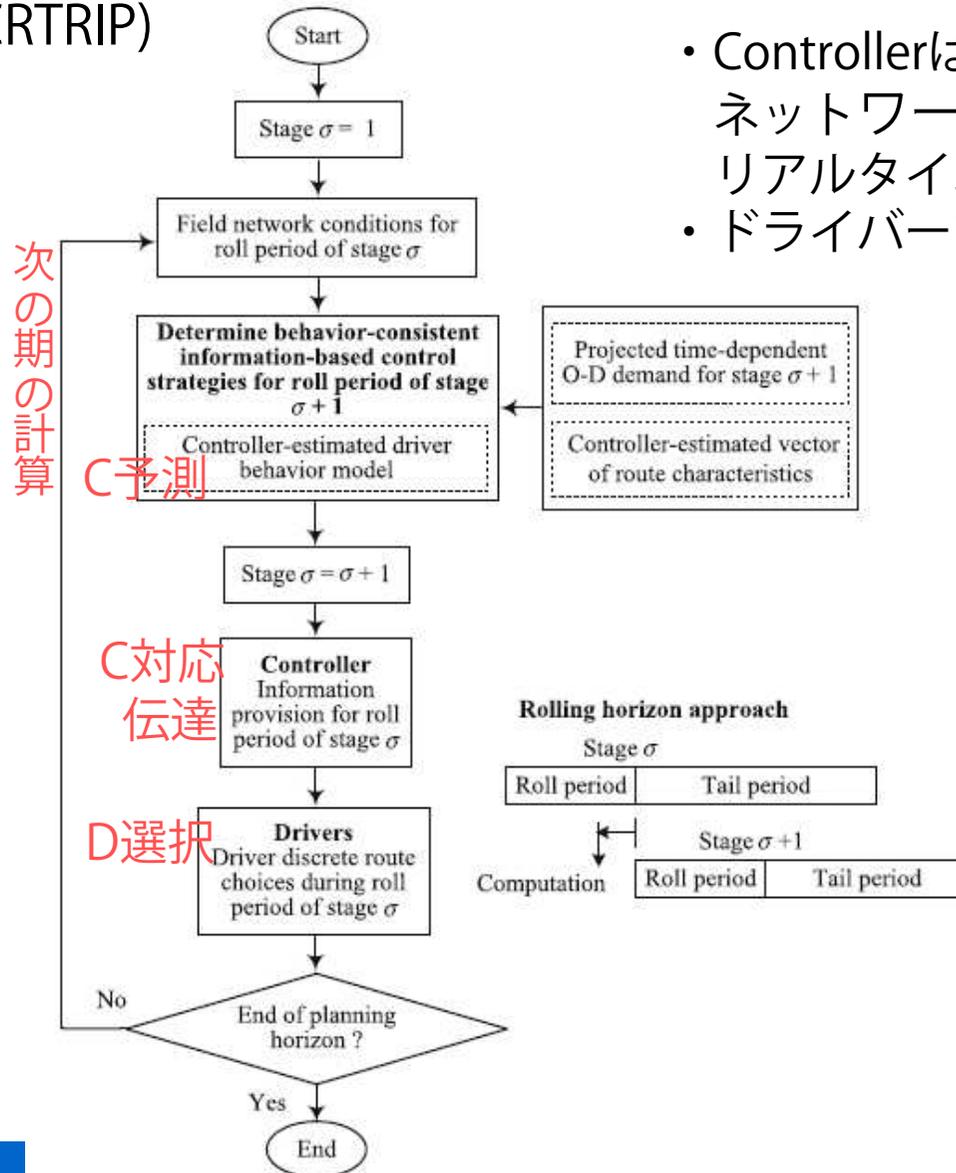
ポイント

- 行動一貫性を導入
- 情報の伝搬を政策変数としてSOを実現, かつ交通流はDTAで再現
- rolling horizonの枠組みで交通状態を再現

# Problem Description

Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision (BCRTRIP)

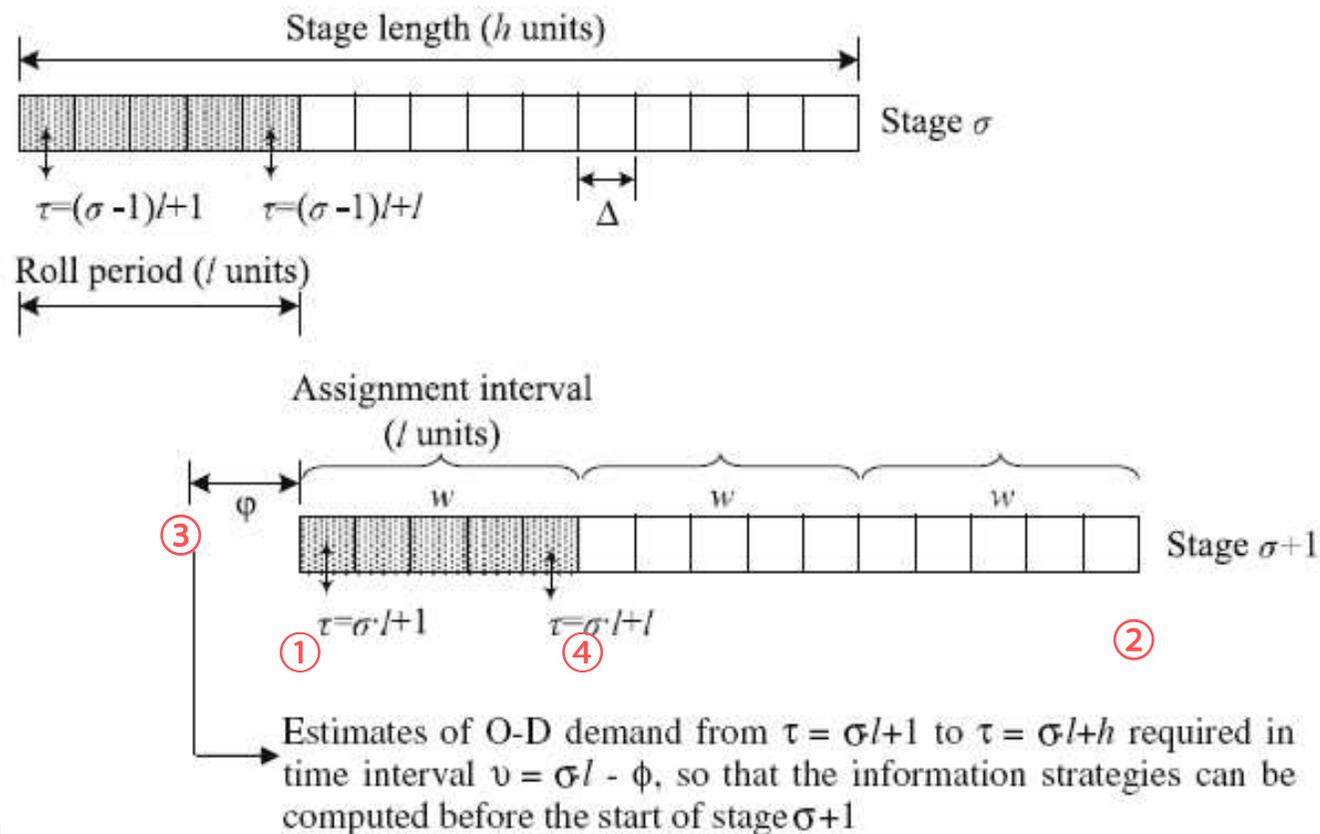
- Controllerは連続時間上でのネットワークパフォーマンス最適化のため、リアルタイム経路情報をドライバーに伝達。
- ドライバーは経路情報をうけて、経路を選択。



# Rolling horizontal approach

時間軸を離散的かつ集約的に取り扱い，動的な問題を静的に取り扱う

- ①～②の間のOD需要を推定
- ⇒前倒しで③～②の間で推定を行う
- ⇒ $w$ ごとに配分計算を行う
- ⇒①～④を確定させて，次のstageへ



# 用語の定義

DK: Controller-desired routes

管理者がドライバーに望むルート。SODTAで求める。

PK: Driver-preferred routes

ドライバーが望むルート。調査結果から求める。

CK: Controllable routes

DKとPKの組合せ

Behavior-consistency gap

DKを選択するドライバー数と(管理者が設定する)DKを選択してほしいドライバー数の差

## ●決定変数

—DKを選択してほしいドライバー数

—DK

※ネットワークの状態, 情報戦略, ドライバーの経路選択, 動的フローで問題を構成

# 定式化

Given: 所与条件

- (i)  $G(N, A)$  ネットワーク
- (ii)  $\hat{R}_{ij}^{u\tau}$ ;  $\forall i, j, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + h$  将来のOD需要予測(当該期内で発着)
- (iii)  $Q_{i^*j}^{kua}$ ;  $\forall i^*, j, u, a, \kappa = 1, \dots, \sigma \cdot l$  当該期で目的地に到着しないOD需要
- (iv)  $\hat{S}_{i^*ij}^{kut}$ ;  $\forall i^*, i, j, \kappa = 1, \dots, \sigma \cdot l, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + h$  出発済みのOD需要
- (v)  $PK_{ij}^r$ ;  $\forall i, j, r \in \{\hat{R}_{ij}^{u\tau} \cup \hat{S}_{i^*ij}^{kut}\}$  管理者の予測PK
- (vi)  $\hat{X}_{ijk}^{rt}$ ;  $\forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \{\hat{R}_{ij}^{u\tau} \cup \hat{S}_{i^*ij}^{kut}\}, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l$  ドライバーの経路選択  
を踏まえた  
管理者の交通状態予測
- (vii)  $Y_{ijk}^{rv}$ ;  $\forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \hat{S}_{i^*ij}^{kut}$  過去の推奨ルート
- (viii)  $\delta_{ijk}^{rv}$ ;  $\forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \hat{S}_{i^*ij}^{kut}$  ドライバーのルート選択
- (ix)  $\Omega^{ur}$   $\forall u, r \in \{\hat{R}_{ij}^{u\tau} \cup \hat{S}_{i^*ij}^{kut}\}$  ドライバーの情報収受有無のクラスuへの所属
- (x)  $\hat{F}$  個々のドライバーの経路選択の推定モデル

# 定式化（目的関数，経路予測）

目的関数: 当該rolling periodでの旅行時間最小化

Objective function (controller objective):

$$\text{Min.} \left\{ \sum_j \sum_u \sum_{\tau=\sigma \cdot l+1}^{\sigma \cdot l+1} \left[ \left( \sum_{i^*} \sum_{\kappa=1}^{\sigma \cdot l} \sum_a |Q_{i^*j}^{\kappa u a}| - \sum_i \sum_{\tau=\sigma \cdot l+1}^{\tau} \sum_{r \in S_{ij}^{u\tau}} \sum_{k \in PK_{ij}^r} \delta_{ijk}^{r\tau} \right) \cdot \Delta \right] \text{ period内でのOD発着別に合計} \right. \\ \left. + \sum_i \sum_j \sum_u \sum_{\tau=\sigma \cdot l+1}^{\sigma \cdot l+1} \sum_{r \in S_{ij}^{u\tau}} \sum_{k \in PK_{ij}^r} [T_{ijk}^{r\tau} \cdot \delta_{ijk}^{r\tau} (\theta_{ijk}^{\rho(\sigma+1)})] + \sum_i \sum_j \sum_u \sum_{\tau=\sigma \cdot l+1}^{\sigma \cdot l+1} \sum_{r \in R_{ij}^{u\tau}} \sum_{k \in PK_{ij}^r} [T_{ijk}^{r\tau} \cdot \delta_{ijk}^{r\tau} (\theta_{ijk}^{\rho(\sigma+1)})] \right\} \quad (1)$$

制約条件

管理者のドライバー経路予測

*Controller-estimated driver behavior*

$$\hat{\delta}_{ijk}^{r\tau} = \hat{F}[(\hat{X}_{ijk}^{r\tau}, Y_{ijk}^{r\tau}), \forall k \in \hat{PK}_{ij}^r]; \quad \forall i, j, k \in \hat{PK}_{ij}^r, \quad r \in \{\hat{R}_{ij}^{u\tau} \cup \hat{S}_{ij}^{u\tau}\}, \quad \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + 1 \quad (2)$$

# 定式化(需要保存則, 情報制御)

制約条件:  
需要保存則

*Demand conservation constraints*

$$\widehat{S}_{ij}^{u\tau} = \bigcup_{\kappa=1}^{\sigma \cdot l} \bigcup_{i^*} \widehat{S}_{i^*ij}^{\kappa u\tau}; \quad \forall i, j, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + h \quad (3)$$

$$S_{ij}^{u\tau} = \bigcup_{\kappa=1}^{\sigma \cdot l} \bigcup_{i^*} S_{i^*ij}^{\kappa u\tau}; \quad \forall i, j, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (4)$$

$$\sum_{r \in S_{ij}^{u\tau}} \sum_{k \in PK_{ij}^r} [\delta_{ijk}^{r\tau} \cdot \Omega^{ur}] = |S_{ij}^{u\tau}|; \quad \forall i, j, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R_{ij}^{u\tau}} \sum_{k \in PK_{ij}^r} [\delta_{ijk}^{r\tau} \cdot \Omega^{ur}] = |R_{ij}^{u\tau}|; \quad \forall i, j, u, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (6)$$

情報による制御制約

*Information-based network control constraints*

OD需要, ドライバー選好,  
ドライバー属性, 予測モデルが制御変数に影響

$$\theta_{ijk}^{\rho(\sigma+1)} = g_{\theta}[(G(N, A), \widehat{R}_{ij}^{u\tau}, \widehat{S}_{ij}^{u\tau}, \widehat{PK}_{ij}^r, \widehat{X}_{ijk}^{r\tau}, Y_{ijk}^{rv}, \delta_{ijk}^{rv}, \Omega^{ur}, \widehat{\delta}_{ijk}^{r\tau}(\widehat{F}))]; \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, u, r, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + h]; \quad (7)$$

$$\forall i, j, k \in CK_{ij}^{\rho(\sigma+1)}$$

$$Y_{ijk}^{r\tau} = g_Y(\theta_{ijk}^{\rho(\sigma+1)}, Y_{ijk}^{rv}, \delta_{ijk}^{rv}, \Omega^{ur}); \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \{R_{ij}^{u\tau} \cup S_{ij}^{u\tau}\}, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (8)$$

# 定式化（フローモデル，保存則）

制約条件:

フローモデル（経路選択モデル，時空間変数）

*Flow modeling constraints*

$$\delta_{ijk}^{r\tau} = F[(X_{ijk}^{r\tau}, Y_{ijk}^{r\tau}), \forall k \in PK_{ij}^r; \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \{R_{ij}^{u\tau} \cup S_{ij}^{u\tau}\}, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (9)$$

$$\xi_{ijk}^{tar\tau} = g_{\xi}[(R_{ij}^{u\tau}, Q_{i^*j}^{\kappa ua}, \delta_{ijk}^{r\tau}), \forall i, i^*, j, k \in PK_{ij}^r, \kappa = 1, \dots, \sigma \cdot l, u, a, r \in \{R_{ij}^{u\tau} \cup Q_{i^*j}^{\kappa ua}\}, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l];$$

$$\forall i, j, k \in PK_{ij}^r, t, a, r \in \{R_{ij}^{u\tau} \cup Q_{i^*j}^{\kappa ua}\}, \tau = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (10)$$

$$x^{ta} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r \sum_{\tau} \xi_{ijk}^{t-1, ar\tau}; \quad \forall t, a \in A \quad (11)$$

$$T_{ijk}^{r\tau} = \sum_{t=\sigma \cdot l + 1}^{\sigma \cdot l + l} \sum_a (\xi_{ijk}^{tar\tau} \cdot \Delta); \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \in \{R_{ij}^{u\tau} \cup S_{ij}^{u\tau}\}, \tau = \sigma \cdot \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l \quad (12)$$

$$x^{\sigma \cdot l + 1, a} = \sum_{\kappa=1}^{\sigma \cdot l} \sum_{i^*} \sum_j \sum_u |Q_{i^*j}^{\kappa ua}|; \quad \forall a \in A \quad (13)$$

フロー保存則

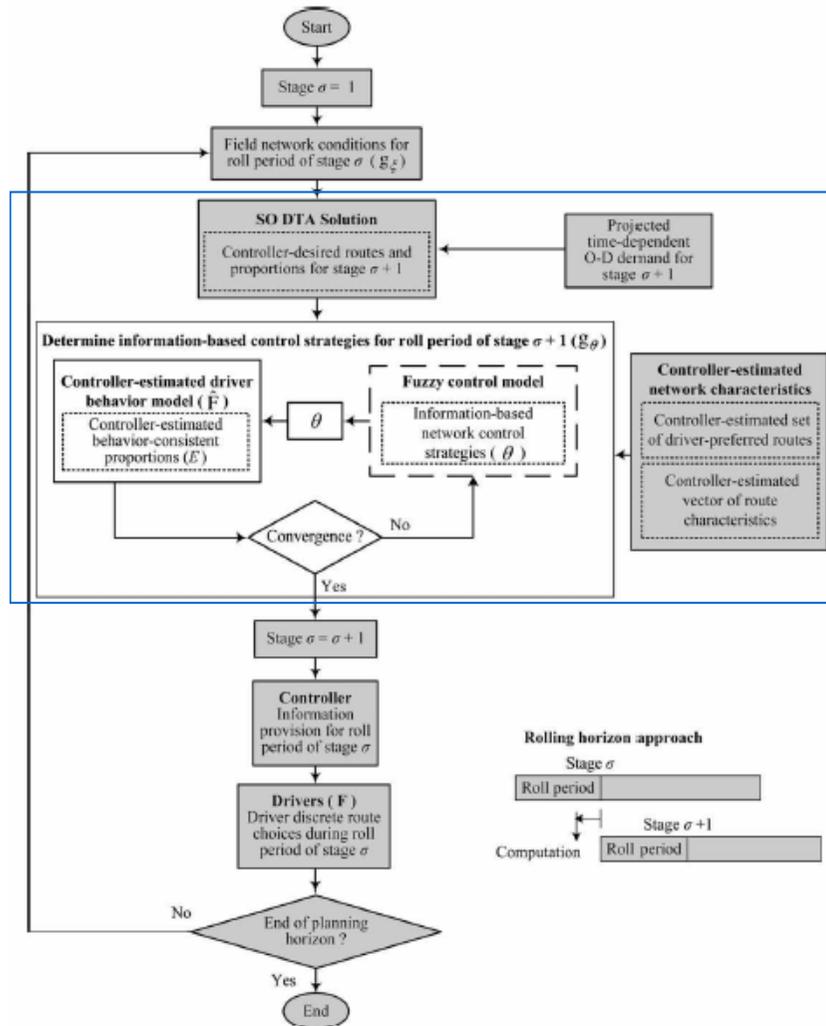
*Flow conservation constraints at nodes and links*

$$\sum_b d^{tb} = \sum_c m^{tc} + L_n^t - O_n^t; \quad \forall t, n \in I, b \in B(n), c \in C(n) \quad (14)$$

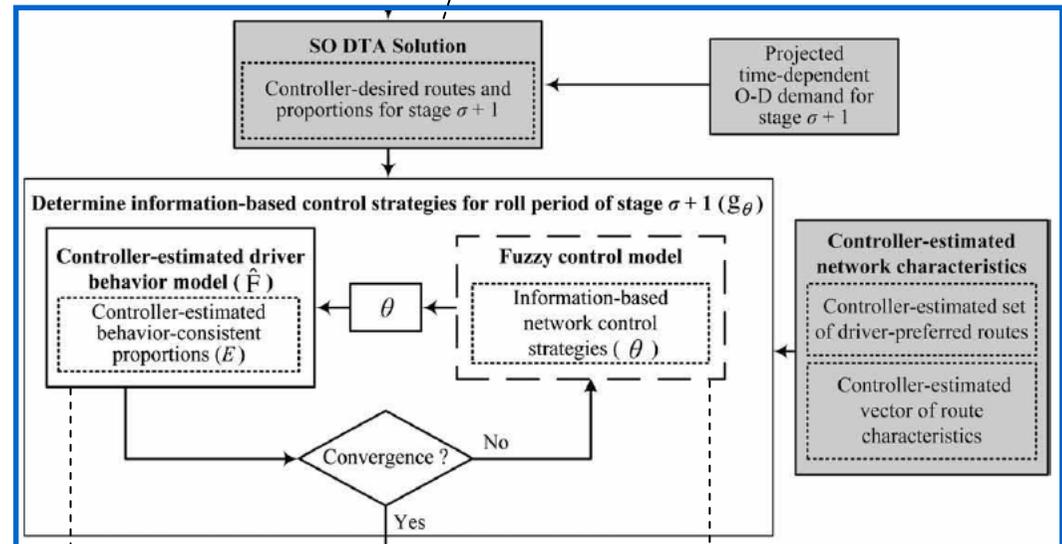
$$x^{ta} = x^{t-1, a} + d^{t-1, a} - m^{t-1, a}; \quad \forall t, a \in A \quad (15)$$

非負制約，定義制約

# Solution Concept



SO-DTAモデルにより  
管理者の望むルートを決定



情報戦略の下で,  
ドライバーの行動を予測  
⇒制御割合Eが算出

目標とする  
制御ドライバー割合  
(情報戦略theta)をたてる

# Experiments 条件設定

## ○Network Character

- 16mile
- 197node
- 460link
- 43zone
- I-80/94は渋滞がひどい
- リアルタイム情報が  
ドライバーに届く  
最新交通システムが配備

## ○Behavior Character

- 情報感度

less responsive 又は more responsive

- PK (ドライバーの望むルート) 列挙

- 時間帯別UEにより時間帯別旅行時間を算出

- ODペアごとに5つのPKを旅行時間ベースで算出

※利用者は均衡状態の旅行時間を念頭に経路候補を持つ

## ○SO-DTA

Dynasmart(SO計算可, 逐次選択可)を利用

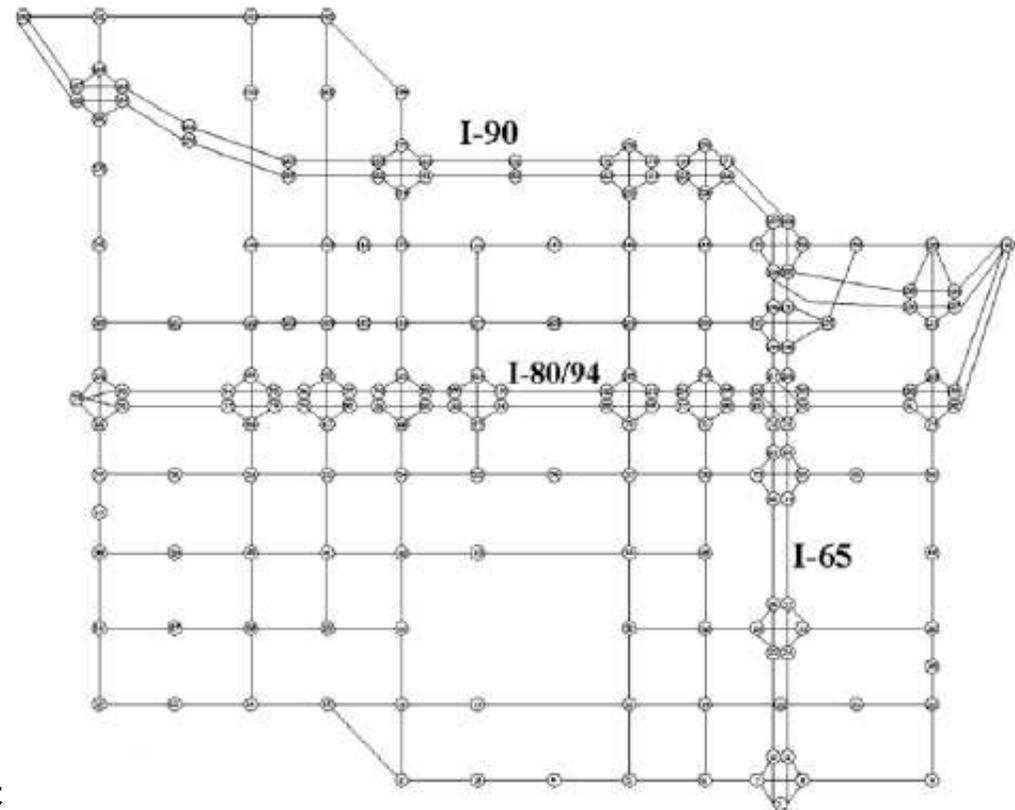


Fig. 5. Borman expressway corridor network.

# Experiments ドライバーの経路選択モデル

## ○ドライバーの経路選択モデル

### Path Size MNLを適用

(Ben-Akiva and Bierlaire(1999), Ramming(2002) )

$$U_{ijk}^{rt} = \beta_{ET}^r \cdot ET_{ijk}^{rt} + \beta_C^r \cdot C_{ijk} + \beta_Y^r \cdot Y_{ijk}^r t + \beta_{PS}^r \cdot \ln(PS_{ijk}^r) + \beta_{SW}^r \cdot SW_{ijk}^r t + \varepsilon_{ijk}^{rt}; \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r, t \quad (28)$$

where

管理者推奨経路ダミー

$$PS_{ijk}^r = \sum_{a \in \Gamma_{ijk}} \left( \frac{l_a}{L_{ijk}} \right) \frac{1}{\sum_{m \in PK_{ij}^r} \left( \frac{L_{ijk}^i}{L_{ijm}^i} \cdot \Theta_{ajm} \right)}; \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r \quad (29)$$

$$SW_{ijk}^{rt} = 1 \iff \left[ \frac{\sum_{n \in \Pi_{ijk}} n}{\sum_{n \in \Pi_{ijm}} n} = 1 \right], 0 \text{ otherwise}; \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r, t \quad (30)$$

$U_{ijk}^{rt}$	is the utility of route $k$ for driver $r$ leaving node $i$ for node $j$ in period $t$ , $k \in PK_{ij}^r$
$\beta_x^r$	is the coefficient of variable/function $x$ for driver $r$
$ET_{ijk}^{rt}$	is the driver-expected travel time on route $k$ for driver $r$ leaving node $i$ for node $j$ in period $t$ , $k \in PK_{ij}^r$
$C_{ijk}$	is the number of nodes on route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$
$PS_{ijk}^r$	is the path-size component for driver $r$ and route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$
$\Gamma_{ijk}$	is the set of links on route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$
$l_a$	is the length of link $a$ , $a \in A$
$L_{ijk}$	is the length of route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$
$\Theta_{ajm}$	is the link-route incidence dummy; 1 if route $k$ contains link $a$ , and 0 otherwise
$\lambda$	is a path-size model parameter
$\Pi_{ijk}$	is the set of nodes on route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$
$SW_{ijk}^{rt}$	is a route switching dummy; 1 if by choosing route $k$ from his/her current route $\bar{m}$ , and 0 otherwise, $k, \bar{m} \in PK_{ij}^r$
$\varepsilon_{ijk}^{rt}$	is an i.i.d. extreme value disturbance or random component for driver $r$ in time period $t$ for route $k$ connecting $ij$ , $k \in PK_{ij}^r$

管理者のドライバー行動予測は  
観測データベースのモデルを用いる  
一推奨経路に従うかは、閾値関数で決定

$$\psi_{ijk}^{rt} = g_{\psi}(\delta_{ijk}^{rt}, Y_{ijk}^{rt}); \quad \forall i, j, k \in PK_{ij}^r, r, t = \sigma \cdot l + 1, \dots, \sigma \cdot l + l$$

# Experiments Scenario

## 1. No-info

ドライバーへの情報なし. 過去の経験から経路選択 (基準ケース)

## 2. SODTA

SODTAの通りにドライバー移動 (最短時間解)

## 3. SO-info

SO経路の情報を提供. SO経路がPK非含なら, ドライバーは選択しない.  
含まれるならその情報を利用.

SO経路を通ることが期待されるドライバーにのみ情報提供.

## 4. SO-CK-info

SO経路の情報がPKに含まれるドライバー全員に情報提供.

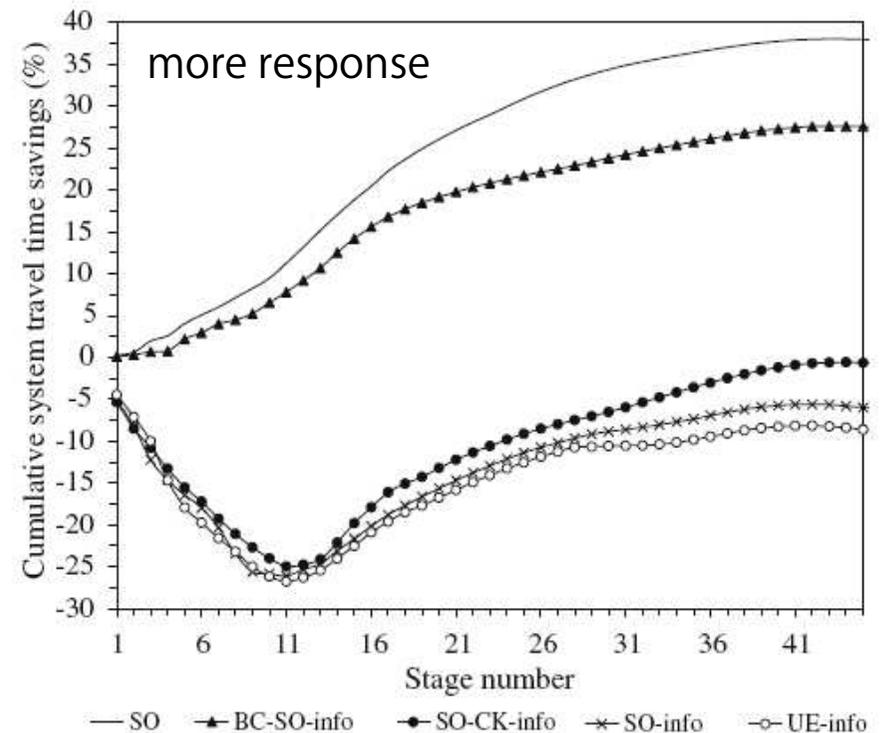
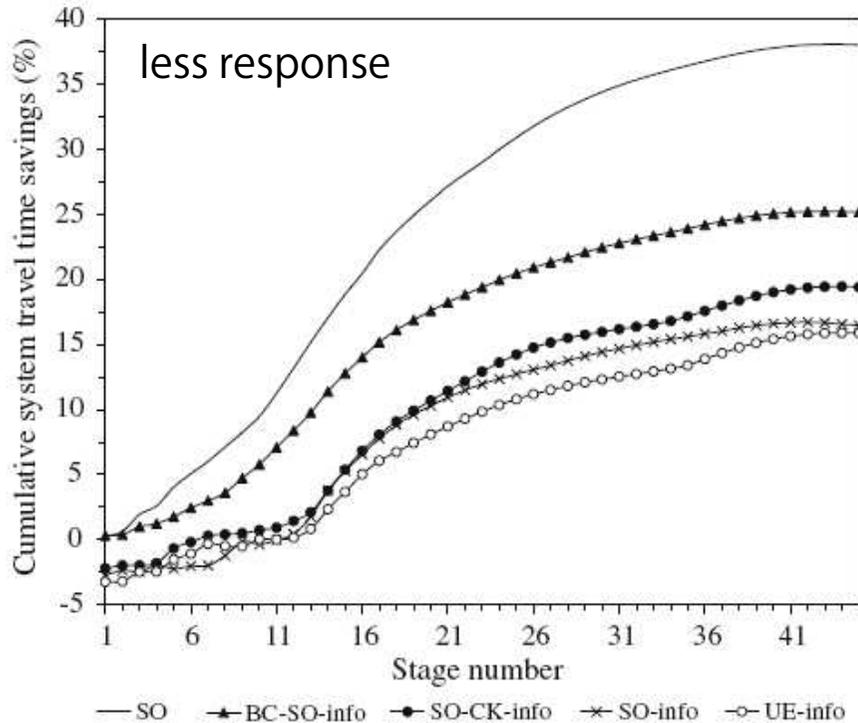
## 5. UE-info

UE経路の情報を提供. 他はSo-infoと同じ.

## 6. BC-SO-info

経路に従うことが期待されるドライバーにのみに変更しうる経路の情報を提供.

# Experiments Result I



- No-infoを基準とし，累積旅行時間の減少分を計算
- BC-SO-infoがSOの次により結果
- more response では経路指示に従う割合が高まり，また，よりルートの魅力が増すために指示がない人も集中し，逆に混雑が発生

# Experiments Result II

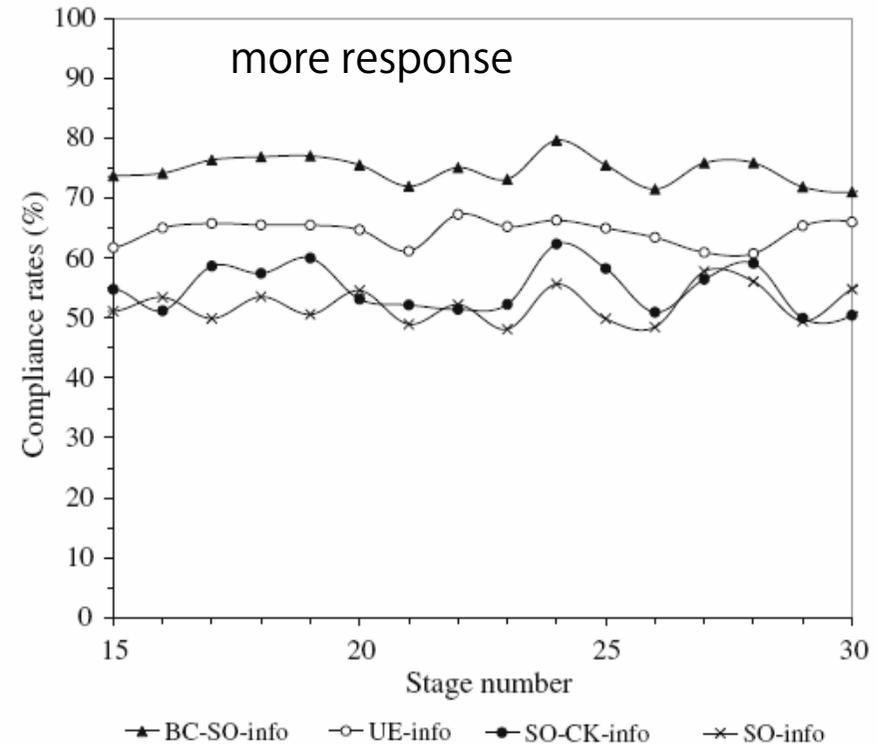
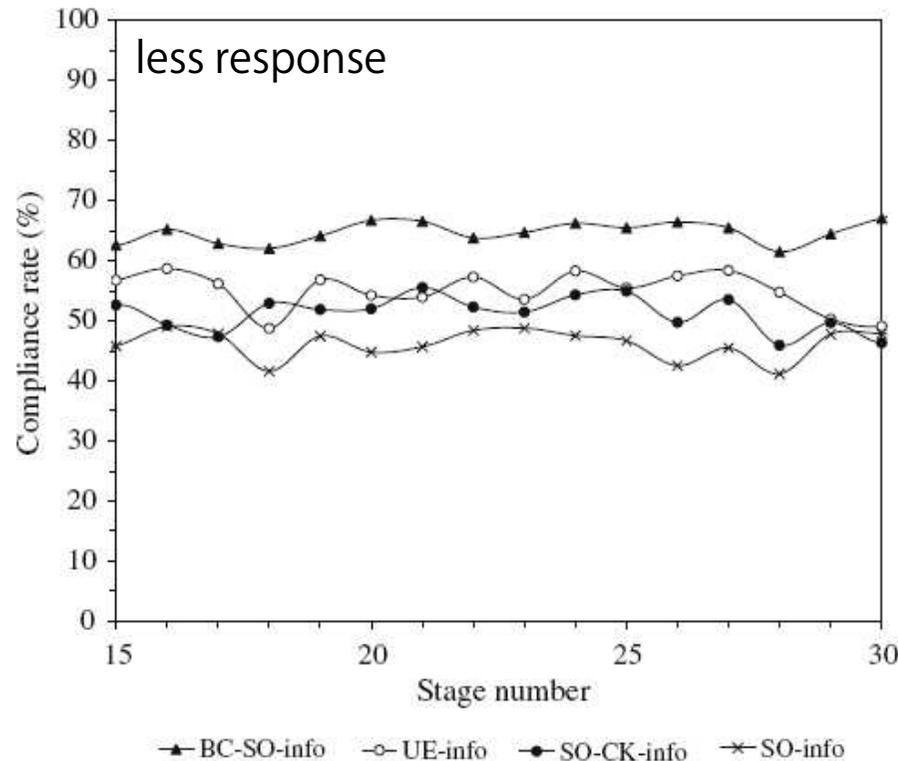


Fig. 9. Compliance rates under more responsive behavior.

- BC-SO-infoは従う割合が一番高い
- more response のほうが従う割合が高い

# まとめ

- 管理者がドライバーの行動選択を予測し、経路情報提示によってネットワーク制御を行う枠組みを構築
- 最適な経路情報提示戦略は繰り返し計算により算出
- 交通流はrolling horizonの枠組みで動的な交通状態を再現
- SOの次に旅行時間短縮効果があり、実際に経路情報に従う割合も増加

ご清聴ありがとうございました.