

Optimization of transit priority in the transportation network using a decomposition methodology

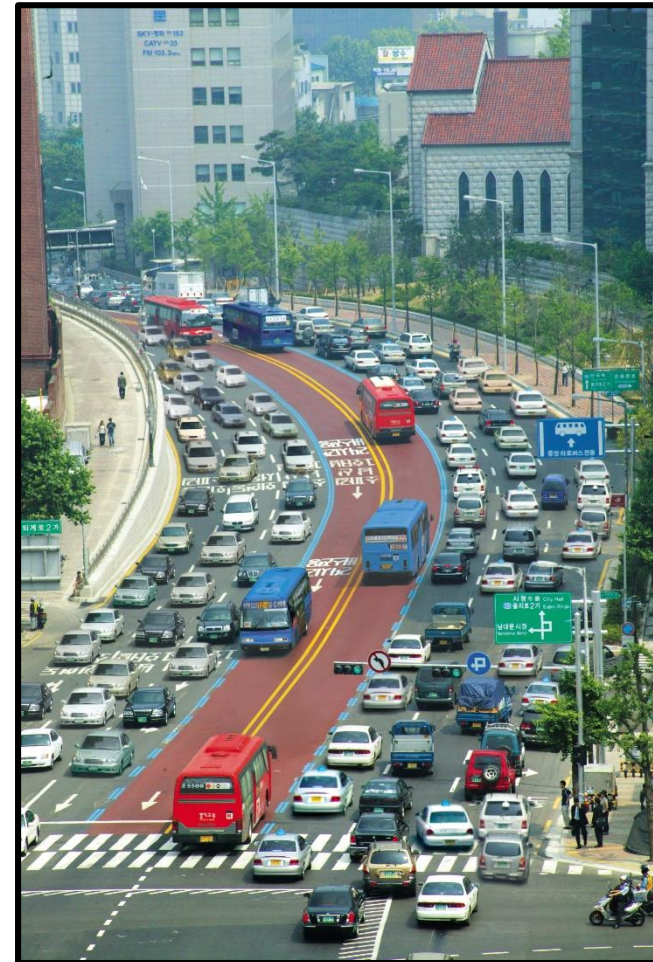
M. Mesbah, M. Sarvi, I. Ouveysi, G. Currie

Transportation Research Part C, Vol. **19** (2), pp. 363-373, (2011).

20140628

社会基盤学専攻 交通研 伊藤篤志

- ・バス専用レーンの最適配置手法の提案
 - ・総旅行時間最小化
- ・計算において, 分解法を導入
- ・例題と結果



ベンダースの分解原理

2

数理計画法の定式化の中に, 構造を異にした2種類の変数が同居

刀根(2007)¹⁾

例) [実数変数]+[整数変数]

[線形変数]+[非線形変数]

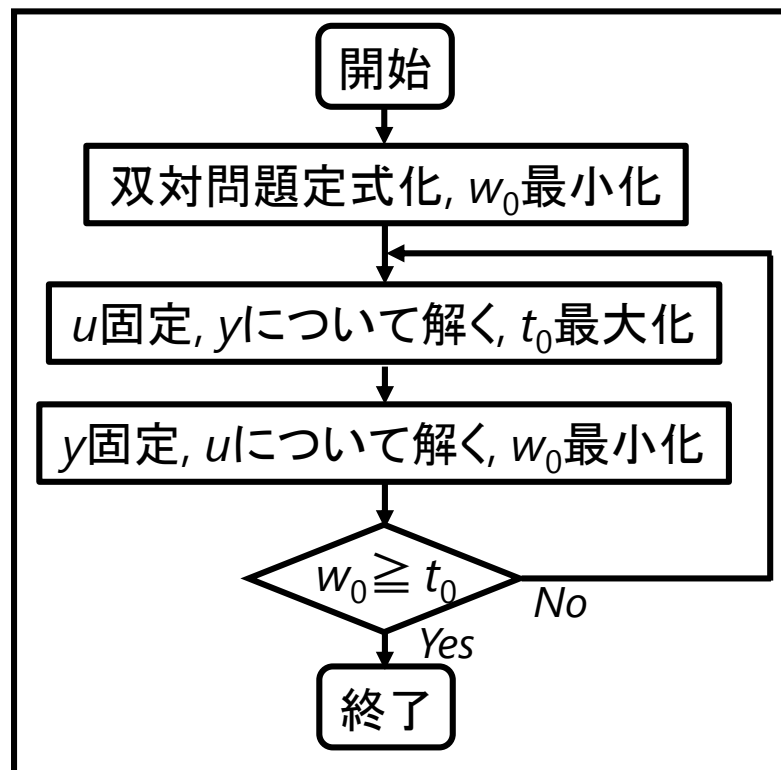
[ネットワーク型変数]+[非ネットワーク型変数]

それぞれの問題に分解, それを持ち寄って混合問題を解決する→分解原理

$$\max_{x, y} \{z(x, y) = \mathbf{c}\mathbf{x} + \mathbf{d}\mathbf{y} \mid \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{y} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq 0, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^p, \mathbf{y} \in Y \subset \mathbb{R}^q\}$$

双対問題

$$\min \{w(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{d}\mathbf{y} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\mathbf{y}) \mid \mathbf{u}\mathbf{A} \geq \mathbf{c}, \mathbf{u} \geq 0\}$$



ベンダースの分解原理

3

問題

$$\max_{x,y} \{z(x,y) = \mathbf{c}x + \mathbf{d}y \mid \mathbf{A}x + \mathbf{B}y \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq 0, \mathbf{x} \in R^p, \mathbf{y} \in Y \subset R^q\}$$

手順1

$\bar{\mathbf{y}} \in Y$ をひとつ選び, 固定

双対問題 $\min\{\mathbf{d}\bar{\mathbf{y}} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\bar{\mathbf{y}}) \mid \mathbf{u}\mathbf{A} \geq \mathbf{c}, \mathbf{u} \geq 0\}$ を解く

1と2に場合分け

1. (a)が最適解 \mathbf{u} をもつ

→ \mathbf{u} を頂点集合 V に入れる

2. (a)は下に無界で, $\mathbf{u}\mathbf{A} \geq \mathbf{c}, \mathbf{u} \geq 0$ なる方向 $\boldsymbol{\mu}$ が見つかる

→ $\boldsymbol{\mu}$ を端線集合 W に入れる

(a)

	実数	二値
max z =	$3x_1 + 5x_2$	$+ 2y_1 + 4y_2$
-	$x_1 + 3x_2 + 3y_1 - 2y_2 \leq 5$	
-	$4x_1 + x_2 - y_1 + y_2 \leq 8$	
	$x_1 - x_2 + y_1 - y_2 \leq 4$	
	$x_1, x_2 \geq 0$	$y_1, y_2 \in \{0, 1\}$

$\bar{y}_1 = 0, \bar{y}_2 = 0$ とする

$$\mathbf{d}\bar{\mathbf{y}} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\bar{\mathbf{y}})$$

$$= (2 \ 4) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + (u_1 \ u_2 \ u_3) \left(\begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

$$= 5u_1 + 8u_2 + 4u_3$$

緩和問題

$$\min w = 5u_1 + 8u_2 + 4u_3$$

$$- u_1 - 4u_2 + u_3 \geq 3$$

$$3u_1 + u_2 - u_3 \geq 5$$

$$u_1, u_2, u_3 \geq 0$$

最適解 $(u_1, u_2, u_3, w_0) = (4, 0, 7, 48)$

この解を頂点集合 V に入れる

$V = \{(4, 0, 7)\}$

双対問題の下界

手順2

V, W により定まる次の t_0, y に関する計画問題を解く
(M は十分大なる正数)

$$\begin{aligned} \max\{t_0 \mid & \\ & t_0 \leq \mathbf{d}\mathbf{y} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\mathbf{y}) \quad (\forall \mathbf{u} \in V), \\ & \boldsymbol{\mu}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\mathbf{y}) \geq 0 \quad (\forall \boldsymbol{\mu} \in W), \\ & \mathbf{y} \in Y, t_0 \leq M\} \end{aligned}$$

- if (b) が不能
→原問題も不能, 終了
- else
 (b) の最適解を $(\hat{t}_0, \hat{\mathbf{y}})$ とする

$$\begin{aligned} & \mathbf{d}\mathbf{y} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\mathbf{y}) \\ &= (2 \ 4) \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} + (4 \ 0 \ 7) \left(\begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right) \\ &= -17y_1 + 26y_2 + 48 \end{aligned}$$

(b)

$$\begin{aligned} \max t_0 \\ t_0 \leq -17y_1 + 26y_2 + 48 \\ y_1, y_2 \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

$$\text{最適解}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{t}_0) = (0, 1, 74)$$

手順3

\hat{y} により定まる, 次の u に関する線形問題を解く
 $\min\{\mathbf{d}\hat{y} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\hat{y}) \mid \mathbf{u}A \geq \mathbf{c}, \mathbf{u} \geq 0\}$ を解く

1と2に場合分け

1. (c)が下に下界

→ その方向 μ をみつけ, 集合 W に加えて手順2へ

2. (c)が最適解 \hat{u} をもつ

→ $\mathbf{d}\hat{y} + \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\hat{y}) \geq t_0$ が成立するかどうかを調べる

if 成立

→ y と x は原問題の最適解 (終了)

else if $t_0 > \mathbf{d}\hat{y} + \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\hat{y})$

→ u を集合 V に加えて手順2へ

$$\begin{aligned} & \mathbf{d}\hat{y} + \mathbf{u}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\hat{y}) \\ &= (2 \ 4) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + (u_1 \ u_2 \ u_3) \left(\begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \\ (c) &= 4 + 7u_1 + 7u_2 + 5u_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min w &= 4 + 7u_1 + 7u_2 + 5u_3 \\ & - u_1 - 4u_2 + u_3 \geq 3 \\ & 3u_1 + u_2 - u_3 \geq 5 \\ & u_1, u_2, u_3 \geq 0 \end{aligned}$$

最適解 $(\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3, \hat{w}_0) = (4, 0, 7, 74)$

(c)が最適解 \hat{u} をもつ

$$\mathbf{d}\hat{y} + \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{b} - \mathbf{B}\hat{y}) = \hat{w}_0 = 74 = t_0$$

が成立, 最適解に達した.

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = (25/2, 13/2)$$

RSA(Road Space Allocation): 道路空間再配分

Local level

幹線リンクへの導入を検討

- ・専用レーンが幹線の交通に与える影響
- ・評価手法を提案
- ・旅行時間, 分散, 初期費用維持費用などの包括的費用

Bly et al.(1978)
Black(1991)
Currie et al.(2007)

ネットワーク全体を通した最適な道路空間再配分の提示に至っていない

Network level

ネットワーク中のあらゆるリンクへの導入を検討

1. 現存のバスネットワークを保持, 自家用車とバスの中で道路空間を再配分
→本研究の対象
2. バスネットワークの改変も含めた公共交通デザイン問題(TNDP)
→公共交通網の再構築は実現性に劣る
→自家用車とバスが相互に与える交通量配分を考えていない

- ・ネットワークレベルで, バスレーン導入の最適組み合わせを見つける手法を提案
 - ・包括的目的関数の導入
 - ・最適値計算手法の導入

モデルの概要

- ・ネットワークデザイン問題(NDP)として扱う Leblanc(1975)
- ・Stackelberg問題
 - ・Leader:交通ネットワーク管理者
 - ・Follower: 交通ネットワーク利用者
- ・管理者が専用レーンの位置を決定
- ・利用者が旅行時間を最小化する経路を選択

仮定

1. ODは一定, 施策の影響を受けない
2. ネットワーク利用者は自家用車とバスの2つに限定
3. レイアウト, リンク情報, コスト関数, 操作詳細は既知
4. バス経路, 頻度, バス停位置は一定
5. 専用レーンの導入に伴い, バスの旅行時間は減る
バス停の容量は無限, 1つのレーンに制限されない

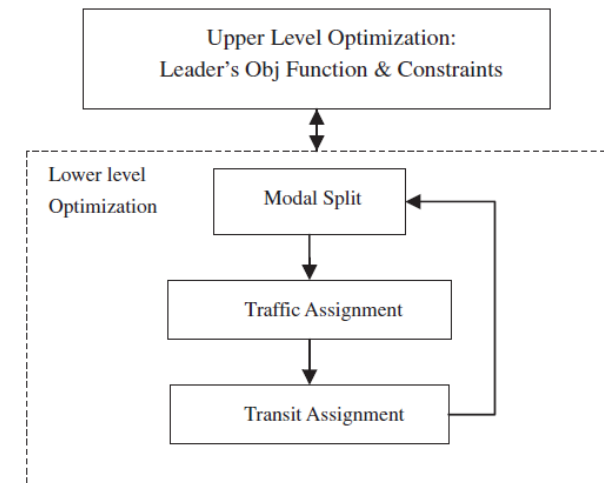


Fig. 1. Schematic representation of the bi-level approach.

定式化 - 上位問題

9

目的関数

$$\min Z = \underbrace{\alpha \sum_{a \in A} x_a^c t_a^c(x)}_{\text{自家用車 } c} + \underbrace{\beta \left(\sum_{a \in B} x_a^b t_a^b(x) + \sum_{i \in I} W_i \right)}_{\text{バス } b} \quad \text{総旅行時間}$$

$$+ \underbrace{\gamma \sum_{a \in A} \frac{x_a^c}{Occ^c} l_a}_{\text{自家用車 } c} Imp^c + \underbrace{\eta \sum_{a \in B} f_a s_a}_{\text{バス } b} Imp^b \quad \text{社会的コスト}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \eta (\geq 0)$: 重みづけ, 単位変換, 相対的重要度

$A = A_1 \cup A_2 \cup A'_2$: ネットワーク集合

A_1 : 専用レーン導入不可リンク集合

A_2 : 専用レーン導入可能リンク集合(導入済)

A'_2 : 専用レーン導入可能リンク集合(未導入)

B : バス経路 (徒歩リンク, 乗り換えリンク含む)

$B_i^{+/-}$: リンクの集合(from/to node i)

$x_a^{c/b}$: リンク a の交通量

$t_a^b(x)$: 旅行時間

$t_{0-1,a}^{c/b}(x)$: リンク a の旅行時間

w_i : ノード i での待ち時間

I : バス停の集合

$Imp^{c/b}$: 社会的コスト(排出, 騒音, 事故, 信頼性)

Occ^c : 車利用の平均占有率

l_a : リンク a の長さ

$f_a (= \sum_{p \in L} f_p \xi_{p,a})$: リンク a 上のバス頻度の合計

L : バス路線の集合

f_p : バス路線 p の頻度

$\xi_{p,a}$: バス路線リンク行列

s_a : リンク a のバス旅行時間

制約条件

$$s.t. \sum_{a \in A_2} Exc_a \phi_a \leq Bdg$$

$$\phi_a = 0 \text{ or } 1 \quad \forall a \in A_2$$

導入費用

道路管理者が意思決定する要素
→リンク a にバスレーンを導入するか否か

Bdg : 予算

Exc_a : リンク(a)での専用レーンの導入費用

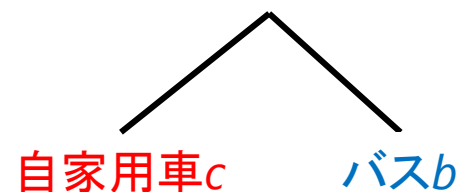
ϕ_a : ダミー変数 (1: リンク混合状態)

- ・OD表は既与
- ・各リンク交通量 $x_a^{c/b}$ および旅行時間 $t_a^{c/b}(x)$ は四段階推定法により算出
- ・上位問題の制約に従う

③交通手段分担モデル

$$P^{c/b} = \frac{\exp(U^{c/b})}{\exp(U^c) + \exp(U^b)}$$

$$U^{c/b} = a_0 + a_1^* X_1^{c/b} + \dots + a_n^* X_n^{c/b}$$



x_1, x_2, \dots, x_n : 説明変数 (旅行時間, 費用など)

a_0, a_1, \dots, a_n : 係数

④リンク配分モデル

f_k^{rs} : rs間経路k上交通量
 q_{rs} : rs間交通割合
 $\delta_{k,a}^{rs}$: リンクaが経路k上にあれば1

自家用車 c

$$\min Y = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^c} t_a^c(x) dx$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}^c \quad \forall r, s$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

$$x_a^c = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{k,a}^{rs} \quad \forall a \in A$$

$$x_a^c \leq M\phi_a \quad \forall a \in A_2$$

$$x_{a'}^c \leq M(1-\phi_a) \quad \forall a' \in A'_2$$

$$x_a^c \geq 0 \quad \forall a \in A$$

目的関数

旅行時間・待ち時間
最小化

制約条件

rs間交通量

非負制約

専用レーン有リンク

専用レーン無リンク

非負制約

q_i^b : ノードiでのバス利用需要

バス b

$$\min W = \sum_{a \in B} x_a^b t_a^b + \sum_{i \in I} w_i$$

$$\sum_{a \in B_i^+} x_a^b - \sum_{a \in B_i^-} x_a^b = q_i^b \quad \forall i \in I$$

$$x_a^b \leq f_a w_i \quad \forall a \in B_i^+, \forall i \in I$$

$$x_a^b \leq M\phi_a \quad \forall a \in A_2$$

$$x_{a'}^b \leq M(1-\phi_a) \quad \forall a' \in A'_2$$

$$x_a^b \geq 0 \quad \forall a \in B$$

制約には二値関数 ϕ を含みながら,
上位問題目的関数はフロー関数 x で構成されている

ϕ の固定

→2つの問題に分枝

二段階問題→ Z と下位問題 (リンク配分モデル)

タスク: サブ問題の双対問題の構築
上位問題目的関数に代替する

Z₁と④リンク配分モデル(自家用車c)

ω, ω': ラグランジュ乗数
n: 繰り返し回数

目的関数

$$\min Y = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^c} t_a^c(x) dx$$

制約条件

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}^c \quad \forall r, s$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

$$x_a^c = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{k,a}^{rs} \quad \forall a \in A$$

$$x_a^c \leq M\phi_a \quad \forall a \in A_2$$

$$x_{a'}^c \leq M(1-\phi_{a'}) \quad \forall a' \in A'_2$$

$$x_a^c \geq 0 \quad \forall a \in A$$

ラグランジュ関数Yⁿを定義

$$Y^n = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^c} t_a^c(x) dx + \sum_{a \in A_2} \omega_a^n (x_a^c - M\phi_a) + \sum_{a' \in A'_2} \omega_{a'}^n (x_{a'}^c - M(1-\phi_{a'})) \quad \dots \textcircled{1}$$

上位問題目的関数Zの第1項Z₁

$$Z_1 = \alpha \sum_{a \in A} x_a^c t_a^c(x) = \alpha Y + \alpha \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^c} x \frac{dt(x)}{dx} dx \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\therefore \sum_{a \in A} x_a t(x_a) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t(x) dx + \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} x \frac{dt(x)}{dx} dx$$

①, ②式より

$$Z_1^n = \alpha \left(\sum_{a \in A} x_a^c t_a^c(x) + \sum_{a \in A_2} \omega_a^n (x_a^c - M\phi_a) + \sum_{a' \in A'_2} \omega_{a'}^n (x_{a'}^c - M(1-\phi_{a'})) \right)$$

$$\min Z = \alpha \sum_{a \in A} x_a^c t_a^c(x) + \beta \left(\sum_{a \in B} x_a^b t_a^b(x) + \sum_{i \in I} W_i \right) + \gamma \sum_{a \in A} \frac{x_a^c}{Occ^c} l_a Imp^c + \eta \sum_{a \in B} f_a s_a Imp^b$$

Z₂と④リンク配分モデル(バスb)

μ, μ' : ラグランジュ乗数
 n : 繰り返し回数

目的関数

$$\min W = \sum_{a \in B} x_a^b t_a^b + \sum_{i \in I} w_i$$

制約条件

$$\sum_{a \in B_i^+} x_a^b - \sum_{a \in B_i^-} x_a^b = q_i^b \quad \forall i \in I$$

$$x_a^b \leq f_a w_i \quad \forall a \in B_i^+, \forall i \in I$$

$$x_a^b \leq M \phi_a \quad \forall a \in A_2$$

$$x_{a'}^b \leq M(1 - \phi_{a'}) \quad \forall a' \in A'_2$$

$$x_a^b \geq 0 \quad \forall a \in B$$

ラグランジュ関数 W^n を定義

$$W^n = \sum_{a \in B} x_a^b t_a^b + \sum_{i \in I} w_i + \sum_{a \in A_2} \mu_a^n (x_a^b - M \phi_a) + \sum_{a' \in A'_2} \mu_{a'}^n (x_{a'}^b - M(1 - \phi_{a'})) \quad \dots \textcircled{3}$$

上位問題目的関数 Z の第2項 Z_2

$$Z_2 = \beta \left(\sum_{a \in B} x_a^b t_a^b(x) + \sum_{i \in I} w_i \right) = \beta W \quad \dots \textcircled{4}$$

③, ④式より

$$Z_2^n = \beta W_2 = \beta \left(\sum_{a \in B} x_a^b t_a^b(x) + \sum_{i \in I} w_i + \sum_{a \in A_2} \mu_a^n (x_a^b - M \phi_a) + \sum_{a' \in A'_2} \mu_{a'}^n (x_{a'}^b - M(1 - \phi_{a'})) \right)$$

$$\min Z = \alpha \sum_{a \in A} x_a^c t_a^c(x) + \beta \overset{Z_2}{\left(\sum_{a \in B} x_a^b t_a^b(x) + \sum_{i \in I} w_i \right)} + \gamma \sum_{a \in A} \frac{x_a^c}{Occ^c} l_a Imp^c + \eta \sum_{a \in B} f_a s_a Imp^b$$

Z_3 と Z_4

$$Z_3^n = \gamma \sum_{a \in A} \frac{x_a^c}{Occ^c} l_a Imp^c$$

$$Z_4^n = \eta \sum_{a \in B} f_a s_a Imp^b$$

Z^n

$Z^n = Z_1^n + Z_2^n + Z_3^n + Z_4^n$: 原問題の上界

緩和問題 v

v : 原問題の緩和問題, 下界を与える

$\min v$

$$v \geq Z^n(\phi, \omega, \omega', \mu, \mu')$$

$$\sum_{a \in A'_2} Exc_a \phi_a \leq Bdg$$

$$\phi = 0, 1$$

Step 0

初期値の設定

上界 = ∞
下界 = $-\infty$
初期解 $\{\phi_a \in A_2\}$
 $n=1$
 ε : 収束定数

Step 1

- ϕ_a を固定
- 下位問題を解き, $x^{c/b}, \omega, \omega', \mu, \mu', Z_n (= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)$ を算出
- 上界 = $\min(\text{下界}, Z^n)$

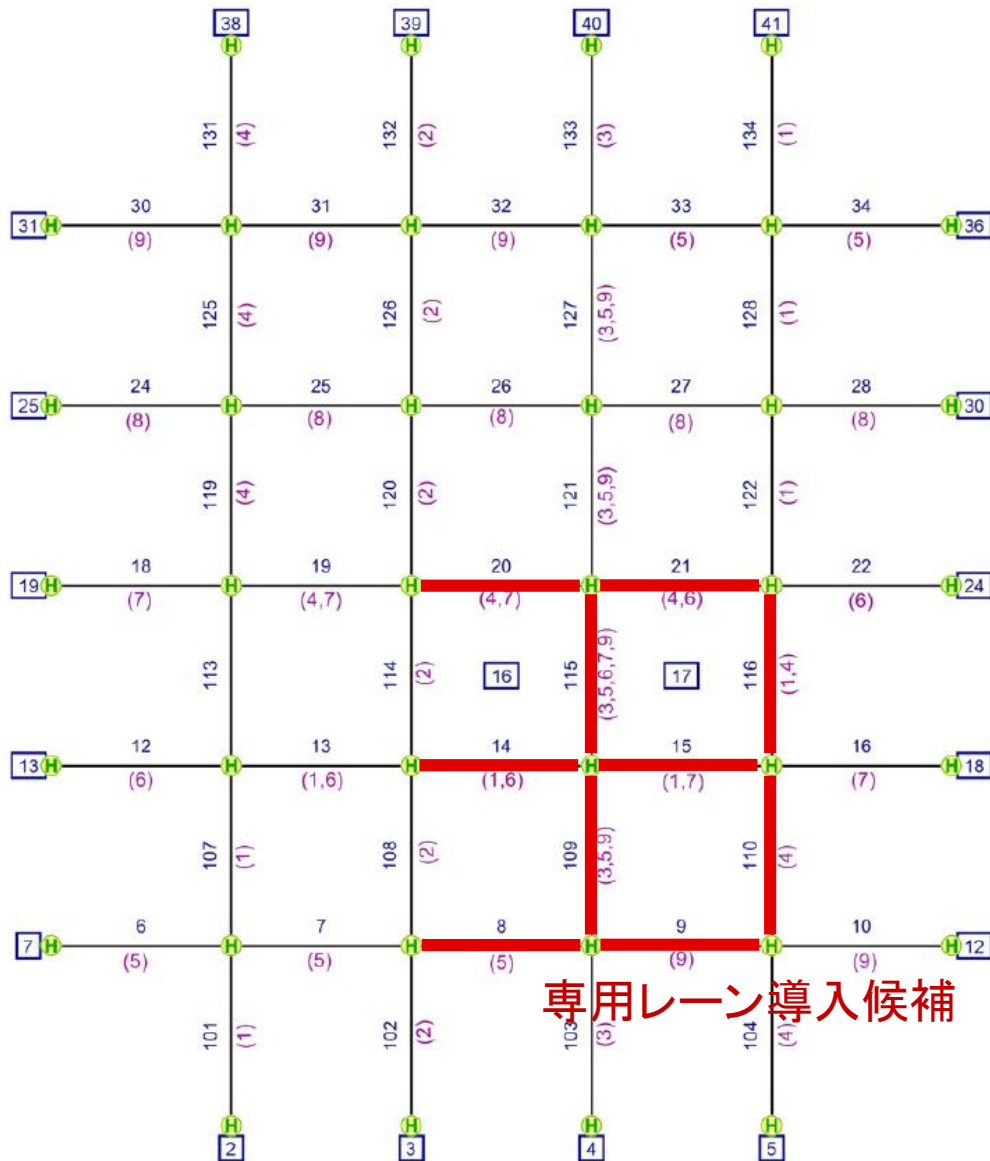
Step 2

- $x^{c/b}, \omega, \omega', \mu, \mu', Z_n (= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)$ を固定
- 緩和問題を解き, ϕ_a と v を算出
- 下界 = v
- if 上界 - 下界 $v \leq \varepsilon$
 終了
- else
 $n = n + 1$, Step 1 に戻る

- ・ノード数: 38
- ・リンク数: 49組(98方向)
- ・各OD間で100/hの交通量
- ・ODノードはネットワーク周囲と16, 17の右のノード(青の四角)
- ・20ペア, 38,000/hの交通量
- ・9バス路線
- ・/5min(路線1-7), /10min(路線8,9)
- ・各リンク長: 400m
- ・各リンク2車線
- ・速度制限 50km/h
- ・予算制約より, 専用レーンは最大3組

③交通手段分担モデルパラメータ
 $(a_0^c, a_0^b, a_1^c, a_1^b) = (10, 16, 1.9, 0.1)$

上位問題目的関数パラメータ
 $(\alpha, \beta, \gamma, \eta) = (0.5, 0.5, 5, 0)$



コスト関数(専用レーン):

$$t_{1,a}^c = t_{0,a} + 2 \left(\frac{x_a^c}{Cap_{1,a}^c} \right) + 3 \left(\frac{x_a^c}{Cap_{1,a}^c} \right)^2, \quad t_{1,b}^t = t_{0,a} \quad \forall a \in A_2$$

t_0 : 自由流でのリンク通過時間
 $Cap_{0-1,a}^c$: リンクaの交通容量
 0: 専用レーンなし, $Cap_{0,a}^c = 1,800$ veh/h
 1: 専用レーン有り, $Cap_{1,a}^c = 1,200$ veh/h

コスト関数(普通車線):

$$t_{0,a}^c = t_{0,a}^b = t_{0,a} + 2 \left(\frac{x_a^c + x_a^t}{Cap_{0,a}^c} \right) + 3 \left(\frac{x_a^c + x_a^t}{Cap_{0,a}^c} \right)^2 \quad \forall a \in A - A_2$$

Table 1
 Combination of transit exclusive lanes in iterations.

Candidate links	Iteration number																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	-	-	*	-	-	*	*	-	-	-	-	*	-	*	-	-	-	*	-
9	-	*	-	-	*	-	-	-	-	*	*	-	-	*	*	-	-	-	-
14	*	-	-	*	-	-	*	-	-	*	-	-	-	-	-	*	*	*	-
15	-	-	-	*	-	*	-	-	-	*	-	*	*	-	-	-	-	*	*
20	*	-	-	-	-	-	-	-	*	-	*	*	-	-	-	-	*	-	-
21	-	-	*	*	*	-	-	-	*	-	-	-	-	*	-	*	-	*	*
109	-	-	*	-	-	-	-	*	-	*	-	-	*	-	-	*	-	-	-
110	*	-	-	-	*	*	-	*	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-	*
115	-	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*	-	-	-	*	-	-
116	-	*	-	-	-	-	*	*	*	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-

Keyz: - normal link, * conjugate link (with exclusive lane).

最適値

→19/120 回の計算で最適組み合わせを発見

- ・ネットワークレベルで, バス専用レーンの最適導入の新しい手法を提言
- ・一般化ベンダース分解を適用, 効率的に最適値に収束

最適化の計算手法

- ・混合整数計画

専用レーンの導入問題最適化

- ・地震後に緊急車両レーンを設ける, とか

$A = A_1 \cup A_2 \cup A'_2$: ネットワーク集合

A_1 : 優先レーン導入不可のリンク集合

A_2 : 優先レーン(専用レーン)のリンク集合

A'_2 : 混合交通リンクの集合 (専用レーンなし)

B : バス経路, 徒歩リンク, 乗り換えリンク含む

$B_i^{+/-}$: リンクの集合 (from/to node i)

L : バス路線の集合

I : バス停の集合

$f_a (= \sum_{p \in L} f_p \xi_{p,a})$: リンク a 上のバス頻度の合計

f_p : バス路線 p の頻度

$\xi_{p,a}$: バス路線リンク行列

$t_a^b(x)$: 旅行時間

l_a : リンク (a) の長さ

s_a : リンク a のバス旅行時間

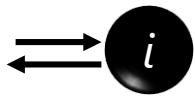
$t_{0-1,a}^{c/b}(x)$: リンク (a) の旅行時間, c : 自家用車, b : バス, 交通量の関数

0: 専用レーンあり, 1: 専用レーンなし

$x_a^{c/b}$: リンク a の交通量

w_i : ノード i での待ち時間

$\alpha, \beta, \gamma, \eta (\geq 0)$: 重みづけ, 単位変換, 相対的重要度



下位問題 3rd model

q_i^b : ノード*i*でのバス利用需要

$$\min W = \sum_{a \in B} x_a^b t_a^b + \sum_{i \in I} w_i$$

旅行時間+待ち時間最小化

$$s.t. \sum_{a \in B_i^+} x_a^b - \sum_{a \in B_i^-} x_a^b = q_i^b \quad \forall i \in I$$

rs間交通量

非負

$$x_a^b \leq f_a w_i \quad \forall a \in B_i^+, \quad \forall i \in I$$

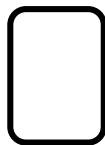
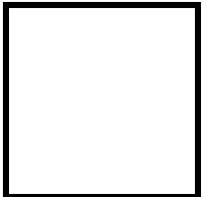
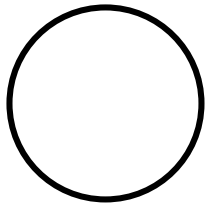
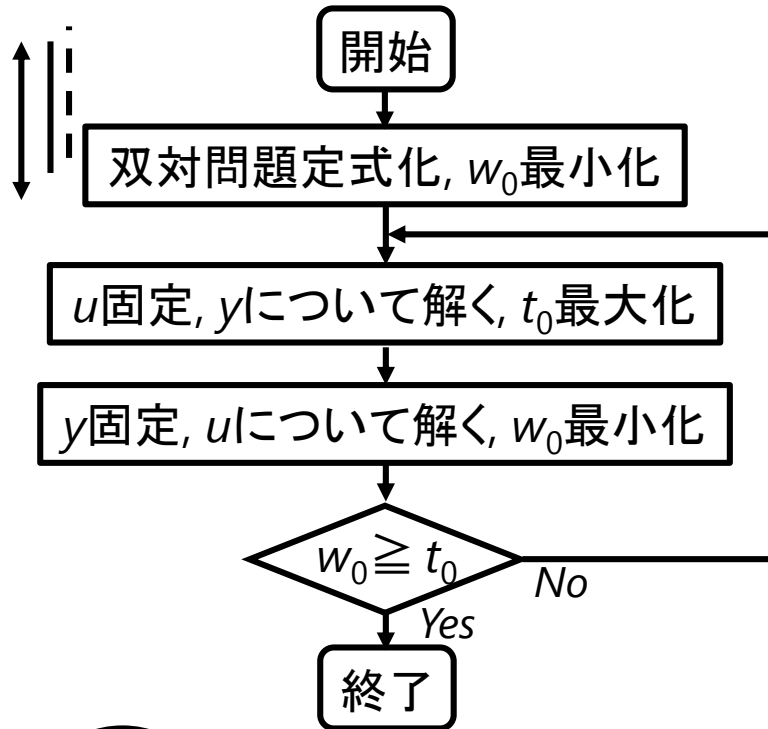
リンク*a*の自家用車交通量

$$x_a^b \leq M \phi_a \quad \forall a \in A_2$$

$$x_{a'}^b \leq M(1 - \phi_a) \quad \forall a' \in A'_2$$

} ノーマルか対のリンクを流れる制約

$$x_a^b \geq 0 \quad \forall a \in B$$



ナップサック問題 (KP)

