

# メタ戦略を用いた都市道路における車線レイアウト最適化

## A Metaheuristic Approach for Designing Lane Layout in Urban Road Networks

情報工学専攻 矢島 和樹

Kazuki YAJIMA

### 概要

都市部では、経済の集中による輸送需要の増加に交通インフラの供給が対応できておらず、道路の利便性が低下している。一方で、人口減少や高齢化による社会情勢の変化により、交通需要が減少していくことが予想されており、車線数を減少させて自転車専用レーンを設けるなど、道路空間の再編によって人優先の快適な空間を創出する動きも見られる。本研究では、車線の向きと道路の交通容量に着目する。メタ戦略を用いて都市道路ネットワークの車線レイアウトの最適化を行う。

**キーワード:** メタ戦略, 利用者均衡配分, 都市道路ネットワーク.

### 1 はじめに

国土交通省の資料によると、平成 14 年度の道路 1km あたりの都道府県別総損失時間は、東京都が最も多く、次いで大阪府、神奈川県、埼玉県、愛知県の順となっており、三大都市圏に集中している。道路交通での移動時間の長時間化は、物流コストの増大や二酸化炭素などの大気汚染物質の排出などの様々な問題を招き、市民生活や経済活動に深刻な影響を及ぼしている。

一方で、人口減少や高齢化によって、交通需要が減少していくことが予想されており、道路空間の再編によって人優先の快適な空間を創出しようという動きも見られる。大阪市の中心部を南北に縦断する幹線道路である御堂筋は、自動車交通量が約 40 年前に比べて約 4 から 5 割減少しているが、自転車交通量は 6 から 7 倍と大きく増加しており、歩行者の安全と自転車の円滑な通行を確保するために、側道を廃止し、これを歩行者及び自転車のための空間として再編する計画が進んでいる。

本研究では、車線の向きと道路の交通容量に着目して都市道路ネットワークの車線レイアウトの最適化を行う。メタ戦略に基づいて、解を生成し車線レイアウトを決定した後に、利用者均衡配分によって評価し、交通需要に対応した最適な車線レイアウトを求める手法を提案する。

### 2 都市道路ネットワークの最適化

#### 2.1 数理モデル

都市部の道路ネットワーク設計問題の数理モデルについて述べる。目的関数、制約、変数は主に以下のものが考えられる。

#### 目的関数

- 利用者視点：移動時間や金銭的コストの最小化
- 管理者視点：収益とコストの差の最大化
- 都市視点：騒音や大気汚染の影響の最小化

#### 制約

- 技術的制約：最小青時間長, 最大サイクル長
- 外部的制約：大気汚染物質の濃度の限界値, 最大騒音レベル
- 行動的制約：最短経路の選択, 利用者均衡

#### 変数

- 整数変数：車線レイアウト, リンク割当
- 連続変数：信号設定, 道路料金, 駐車料金

文献 [1] では、既存の交通資源を効率的に利用するために、現在の道路構成を再編成することに焦点を当て、車線レイアウトと信号設定に注目した都市部の道路ネットワークの設計手法を提案している。目的関数を総移動時間の最小化、制約を技術的制約の最小、最大青時間長、行動制約の利用者均衡としている。道路ネットワークの決定変数として車線レイアウトと信号設定を採用している。車線レイアウトは、既存の道路に対して 4 種類の道路の使い方の中から新たに 1 つ決定する整数変数、信号設定は、青時間長を決定する連続変数を導入することで決定する。

#### 2.2 メタ戦略に基づく解法

文献 [1] で提案されている都市道路ネットワークの最適化は 2 段階で構成される。1 段階目では、車線レイアウトを決定するために、メタ戦略に基づいて整数解を生成する。2 段階目では、信号設定を行うために、決定した車線レイアウトに対して Webster 法を用いて信号パラメータを決定し、利用者均衡配分を行う。1 段階目と 2 段階目を終了判定を満たすまで反復する。

### 3 利用者均衡配分

交通量配分問題は、実際の交通網を対象とし、需要 OD 交通量と配分原則を与件としてネットワークの各リンクを流れる交通量を予測する問題である。中でも利用者均衡配分は、人間の交通行動に基づくより論理性的のある配分理論となっている [3].

#### 3.1 利用者均衡配分モデル

利用者均衡配分とは、一方的に経路を変更することによって最早誰一人として OD 間の実所要時間を改善できない均衡状態に交通量を配分することを表す。これは、「利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい。」という交通均衡の基本概念である Wardrop の第一原則を配分原則とすることで実現される。ただし、この原則が成立するためには、「全ての利用者は常に旅行時間を最小とする行動をする」と「利用者は常に利用可能な経路について完全な情報を得ている」の 2つの前提条件が満たされている必要がある。

#### 3.2 リンクパフォーマンス関数

リンクパフォーマンス関数とは、ネットワークを構成する個々のリンクのサービス水準（一般的に旅行時間）を、リンク交通量とリンク属性の関数として表すものである。米国道路局の開発した以下の BPR 型関数が一般的に用いられる。図 1 に  $t_{a0} = 3, C_a = 5000, \alpha = 0.15, \beta = 4$  とした BPR 型関数を示す。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\}$$

記号は以下の通りである。

$t_a$	リンク $a$ の旅行時間
$t_{a0}$	リンク $a$ の自由旅行時間
$x_a$	リンク $a$ の時間交通量
$C_a$	リンク $a$ の時間交通容量
$\alpha, \beta$	パラメータ

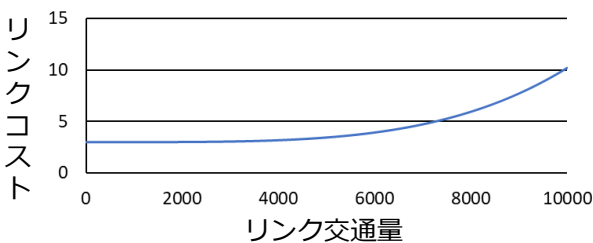


図 1 BPR 型関数

### 3.3 定式化

Wardrop の第一原則は以下のように記述できる。

$$f_k^{rs} > 0 \text{ の時 } c_k^{rs} = c^{rs} \quad \forall k \in K_{rs}, \forall rs \in \Omega \quad (1)$$

$$f_k^{rs} = 0 \text{ の時 } c_k^{rs} \geq c^{rs} \quad \forall k \in K_{rs}, \forall rs \in \Omega \quad (2)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - Q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega \quad (3)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, \forall rs \in \Omega \quad (4)$$

記号は以下の通りである。

$f_k^{rs}$	経路 $k$ の経路交通量
$c_k^{rs}$	経路 $k$ の経路時間
$c^{rs}$	OD ペア $rs$ の旅行時間
$K_{rs}$	OD ペア $rs$ の経路集合
$Q_{rs}$	OD ペア $rs$ の分布交通量
$\Omega$	OD ペアの集合

利用される経路の所要時間は、皆等しいことが式 (1)、利用されない経路の旅行時間よりも小さいかせいぜい等しいことが式 (2) によって表現されている。

この問題を等価な最適化問題に変換し、非線形最適化問題の解法である Frank-Wolfe 法を用いることで解を求める。

## 4 メタ戦略を用いた車線レイアウト最適化

### 4.1 メタ戦略

本研究で使用するメタ戦略について述べる [4]. 本研究では、遺伝アルゴリズム、アニーリング法、タブー探索法を用いる。遺伝アルゴリズム (GA) は、生物の染色体の交叉や突然変異によって新しい世代が形成され、弱いものが淘汰されて強いものが生き残っていくという、生物進化のメカニズムを最適化に応用したものである。複数の解を同時に保持し、それらを集団として改善していくところに特徴を持つ。集団に対して淘汰、交叉、突然変異といった操作を行い新たな解を生成して、最適解を探索する。

アニーリング法 (SA) は、現在の解  $x$  の近傍  $N(x)$  内の各解  $x'$  に、解のよさに応じた遷移確率 (よい解ほど遷移しやすい) を設定し、それに従って次の解を選択する。改悪解であっても遷移する確率を与えることにより、局所最適解からの脱出を図るものである。

タブー探索法 (TS) は、現在の解  $x$  の近傍  $N(x)$  全体の中で、 $x$  以外の最良の解を次の解として選択する、という戦略を基本としており、現在の解  $x$  が局所最適解であっても、他の解への移動が強制される。一般に、探索がいくつか解を経由して、元に戻ることをサイク

リングと呼び、このサイクリングを防ぐためにタブーリストと呼ばれる解集合  $T$  を定義し、これに含まれる解 (禁止解と呼ばれる) への移動を禁止する。すなわち、 $N(x) \setminus (\{x\} \cup T)$  内の最良の解へと移動する。

## 4.2 提案手法

本研究で提案する車線レイアウトの最適化手法について述べる。提案する手法では、解の生成によって車線レイアウトを決定し、決定した車線レイアウトに対して利用者均衡配分を行うことで解を評価する。

本研究では、車線の向きと車線数に焦点を当てて都市道路ネットワークの車線レイアウトの最適化を行う。決定変数は以下の通りである。ここでのシークエンスは、ネットワーク内の車線レイアウトの設計対象である。シークエンスは同様の容量性能をもつリンクの集合で、異なるシークエンス同士でリンクの重複はない。シークエンスに与えられた変数によって車線レイアウトが決定される。

$y_i^{\text{top}}$  シークエンス  $i$  の車線の向きを決定する整数変数。

以下の値を取ることができる。

- 0: リンク削除
- 1: 一方通行 (順方向)
- 2: 一方通行 (逆方向)
- 3: 両側通行

$y_i^{\text{vol}}$  シークエンス  $i$  の車線の容量に関する整数変数。

以下の値を取ることができる。

- 1: 容量を変化させる
- 0: 容量を変化させない

目的関数は、利用者の総移動時間の最小化である。利用者の総移動時間は、決定された車線レイアウトに対して利用者均衡配分を行うことで求める。ただし、車線の向きを変更した結果、全ての OD 需要を満たせない解や、あらかじめ定められた容量を変化させるシークエンス数の条件を満たさない解にはペナルティを付与する。

## 5 数値実験

### 5.1 新宿区周辺の道路ネットワークの作成

株式会社マップルのデジタル道路データベースである MAPPLE 道路ネットワークデータを用いて、新宿区周辺の道路ネットワークを作成する。これらのデータからノードには緯度と経度とノード種別 (交差点, 行き止まりなど), リンクにはリンク長とリンク種別 (国道, 主要道地方道, 一般都道府県道など) を持たせた道路ネットワークを作成する。図 2 に新宿区周辺の道路ネットワークを示す。

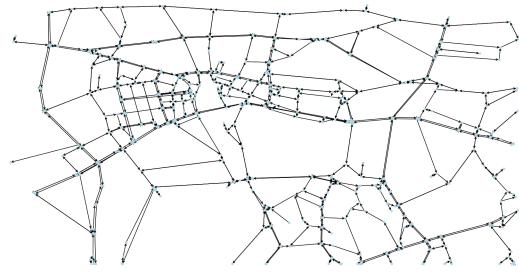


図 2 新宿区周辺の道路ネットワーク

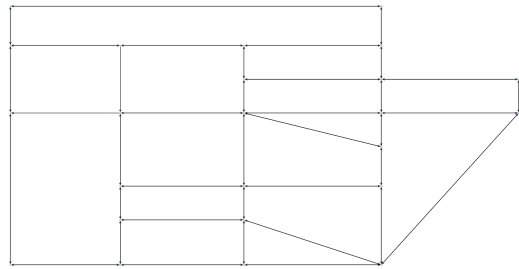


図 3 スーパーホウルズ道路網

また、利用者均衡配分の計算に使われるリンクパフォーマンス関数の各パラメータを文献 [2] を参考に設定する。リンク  $a$  の交通容量  $C_a$  は、リンク種別に応じて決定される。リンク  $a$  の自由旅行時間  $t_{a0}$  は土木学会が全道路種類別共通の標準パラメータとして提案している値を基に  $l_a$  をリンク  $a$  の長さ,  $\bar{l}$  を全リンクの平均長として,  $t_{a0} = 0.74 \times l_a / \bar{l}$  とする。

### 5.2 OD データの作成

国土数値情報が提供する、平成 22 年度の交通流動量パーソントリップ OD 量データを用いて、新宿区周辺の OD データを作成する。このデータには、都市をゾーンに分割し、ゾーン間における目的別、代表交通機関別に集計されたトリップ数が収録されている。本研究では、対象ネットワーク内に含まれる、目的は全て、代表交通機関は、バス、自動車、二輪のデータを使用する。

### 5.3 使用するネットワーク

本研究では、2つのネットワークを対象として数値実験を行った。1つ目のネットワークは、5.1 節で述べた新宿区周辺の道路ネットワークである。2つ目のネットワークは、Transportation Networks for Research [5] で公開されている、米国サウスダコタ州スーパーホウルズ道路網である。図 3 にスーパーホウルズ道路網を示す。このネットワークは、交通量配分のテストネットワークとして広く用いられている。2つのネットワークの特徴を表 1 に示す。

表 1 使用するネットワークの特徴

	スーフォールズ	新宿区周辺
OD ペア数	528	4372
総交通量	360600	310820
ノード数	24	504
リンク数	76	1113
$\alpha, \beta$	0.15, 4	0.48, 2.89
シークエンス数	38	88

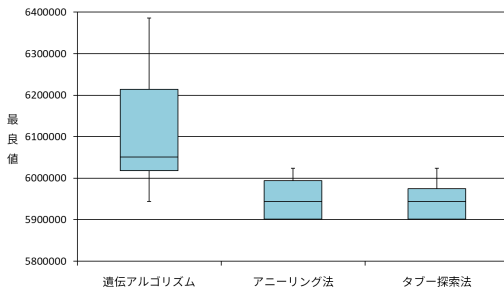


図 4 各メタ戦略で 10 回計算を行った結果の箱ひげ図

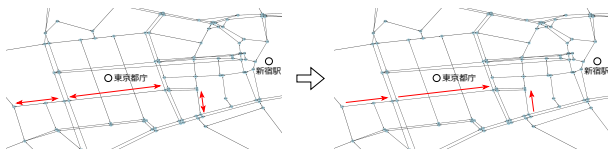


図 5 東京都庁周辺の車線レイアウトの変化

#### 5.4 実験結果

提案手法の数値実験を行う。図 4 に、各メタ戦略で 10 回計算を行った結果の箱ひげ図を示す。遺伝アルゴリズムの性能が最も悪く、アニーリング法とタブー探索法は似た性能を示していることがわかる。これは、近傍探索の方法の違いによるものと考えられる。

次に、新宿区周辺の道路ネットワークに対して増加させるシークエンス数は 5 つとしてアニーリング法を適用した。図 5 に、東京都庁周辺の車線レイアウトの変化を示す。新宿駅へ向かう需要が大きいため、駅へ向かうように片側車線に変更されていることが分かる。

図 6 に、車線数を増加させた 5 か所を示す。赤い丸で囲んだ箇所が車線数が増加した道路である。これらに共通する点は、いずれも駅周辺の道路であるという点であり、バスやタクシーなどの公共交通機関の利用者が多いためこのような結果となったと考えられる。また、図 6 のシークエンス 1 の道路の交通容量を増加させたことにより、交通量は約 1.4 倍に増加した。これによって、シークエンス 1 の周辺道路の交通量も増加しており、それに対応するようにシークエンス 2 の道路の交通容量も増加させている。シークエンス 3 とシークエンス 4 も同様であると考えられる。

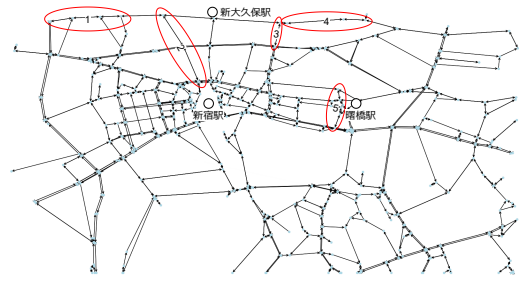


図 6 車線数を増加させた 5 か所

## 6 おわりに

本研究では、車線の向きと道路の交通容量に着目して都市道路ネットワークの車線レイアウトの最適化を行った。新宿区周辺の道路ネットワークと OD データを作成し、提案手法の数値実験を行い、交通需要に対応した車線レイアウトの提案を行った。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。本研究では、OD データを作成する際に、パーソントリップデータのみを使用した結果、道路ネットワーク上の全てのリンクには交通量は配分されておらず、現実とはやや乖離している。道路毎の断面交通量などいくつかのデータを参照して、より現実に即したデータを作成することでより良い車線レイアウトの提案ができると考えられる。

また、車線の向きの変更によって、信号設定や右左折の頻度が変わり、道路の交通容量は変化する。信号設定を行うことで、車線レイアウトの変更による交通量の変化をより再現できると考えられる。

## 参考文献

- [1] G.E. Cantarella, G.Pavone, A.Vitetta: Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, pp. 1682–1695, 2006.
- [2] 島川陽一, 鹿島茂: 交通量配分のための入力データ作成法, *Theory and Applications of GIS*, Vol. 17, No. 2, pp. 69–75, 2009.
- [3] 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法, 丸善, 1998.
- [4] 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組合せ最適化 —メタ戦略を中心として—, 朝倉書店, 2001.
- [5] Transportation Networks for Research Core Team. Transportation Networks for Research. 入手先 < <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks> > (参照 2023-07-19).