

クロスエントロピー法による 交通ネットワーク最適計画問題の数値計算： 進行方向規制された交差点の最適配置問題を例に

小池 卓武¹・中西 航²・柳沼 秀樹³・朝倉 康夫⁴

1 非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: t.koike@plan.cv.titech.ac.jp

2 正会員 東京工業大学特任助教 環境・社会理工学院 土木・環境工学系(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: nakanishi@plan.cv.titech.ac.jp

3 正会員 東京理科大学講師 理工学研究科 土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

4 正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

道路ネットワークをデザインする際、ネットワークの総所要時間(TT)の低減を目指すことはネットワークの輸送性能を高める点で重要である。TT 低減のための具体的操作には、交差点における進行方向規制等のアクセスコントロール(AC)が考えられる。本稿では、幹線道路上の交差点の進行方向規制に着目し、AC された交差点配置の最適な組み合わせを導出するネットワークデザインモデルを提案する。本稿では、この最適化問題をクロスエントロピー法により解く際に設定するパラメータと解の精度、リンクフローの関係を数値計算により分析する。

Key Words : access control , total travel time ,cross entropy, derivation accuracy ,link flow

1. はじめに

道路ネットワークをデザインする際、ネットワークの総所要時間(以下 TT)を低減させることはネットワークの輸送性能を高める点で重要である。OD 交通量が与えられた道路ネットワークの TT を低減させる方策のひとつとして、ネットワーク上の交差点で進行方向を制限し、交差点を通過する車両の過度な交錯を避けることが考えられる。このアプローチを本稿ではアクセスコントロール(以下 AC)と定義する。たとえば、幹線道路と非幹線道路との交差点に AC を適用すると、交通動線が分離され混雑を回避できるとともに、幹線道路における流動性が向上し、TT の低減が見込まれる。

一方、交差点の AC はドライバーに大幅な迂回を強いる場合もあり、TT の増加にも繋がり得る。そのため、AC を適用しない交差点と AC を適用する交差点の最適な組み合わせを求めることが必要となる。しかし、実ネットワークの交差点数は膨大であり、交差点ごとに進行方向規制パターンを複数生成し、そのすべての組み合わせについて TT の比較計算を逐一行う作業には膨大な計算時間を要する。この種の組み合わせ最適化問題の計算量の削減に

ついては、確率的に局所解を求めることによって近似的に組み合わせ最適解を導出する、クロスエントロピー法(以下 CE 法)が有効であると言われている²⁾。

本稿ではアクセスコントロールされた交差点配置の最適な組み合わせを求めるネットワークデザインモデルを提案する。このモデルは、上位問題として進行方向規制する交差点と規制しない交差点の組み合わせ (AC のパターン) を生成し、下位問題として利用者均衡配分(以下 UE 配分)を実行し TT を算出した上で、TT を最小化する AC のパターンを求めるものである。この最適化問題の解法として CE 法を適用することで、ネットワークの TT が最小となる組み合わせ解を最適解として導出する。小池ら¹⁾は、簡略化された接続パターンを仮定して実ネットワークを用いた適用計算を行ったが、モデルそのものの性能の検討は不十分であり、より一般的な問題に展開する際の解析的な議論に踏み込めていない。そこで、本稿では交差点の接続パターンを見直すとともに、数値計算を通して、最適解の精度を調べるとともに、リンクフローを用いて最適解の妥当性の検討する。なお、本稿ではモデル性能の検討に重きを置くため、適用するネットワーク

は、最適解を導出しやすい小規模のものを採用する。

2. 問題設定

(1) 交差点のアクセスコントロール

ネットワークにおける混雑は、幹線、非幹線道路の接続に伴う幹線道路の幹線性低下、および右折車による直進車の直進妨害が主な原因として考えられる。そこで、幹線と非幹線道路が交差する四肢交差点について、図-1 に示すように部分的に中央分離帯を設け、幹線道路上の交差点における非幹線道路の直進と右折を禁止にし、幹線道路の幹線性を改善する操作を AC の操作として採用する。また、進行方向規制による幹線性改善の表現として、幹線道路リンク（図中の幹線道路 (AC)、交差点内 (AC) リンク）の交通容量が増大するものとする。

(2) ネットワークとリンクコスト関数

中央に幹線道路を持つ、ノード数 3×7 個にセントロイド 6 個を加えたラダーネットワーク (図-2) を用いる。ナンバリングした図中の 5 つの交差点を AC の候補点とする。リンクの BPR 関数を式(2-1)に示す。

$$t_a(x_a) = t_0(1 + \alpha(\frac{x_a}{Cap_a})^\beta) \quad (2-1)$$

t_0 は自由走行時間、 x_a はリンク交通量、 Cap_a はリンク交通容量 (表-1)、 α 、 β は道路の形状パラメータ ($\alpha=0.48$ 、 $\beta=2.42$) である。

表-1 BPR 関数パラメータ

リンク	t_0	Cap_0
非幹線道路	10	100
幹線道路	5	100
幹線道路 (AC)	5	120
交差点内	1	100
交差点内 (AC)	1	120

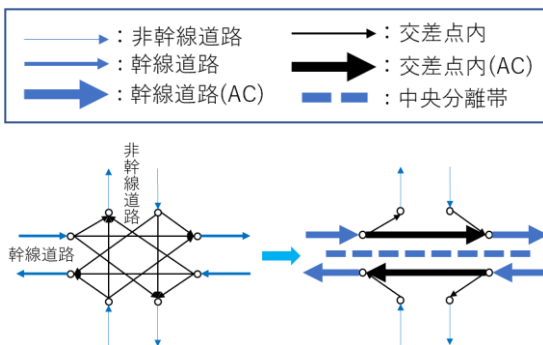


図-1 交差点におけるアクセスコントロール

3. クロスエントロピー法

CE法は、希少事象の確率シミュレーションや最適化問題の求解に利用されるモンテカルロ法²⁾の一つであり、多くの局所解を含む問題設定に適した手法であると言える。CE法では、最適解の候補となる解のサンプルを生起確率によって生成する。生起確率更新の式を式(3-1)に示す

$$P_i = \frac{\sum \rho N ac_i}{\rho N} \quad (3-1)$$

P_i は交差点 i に 1 が与えられる確率 (アクセスコントロール生起確率)、 ρ は良サンプルとして採択する上位解の割合、 N は生成する解のサンプル数、 ac_i は交差点 i が ρN 個の解の中でアクセスコントロールされた回数である。そして、良サンプルを用いて生起確率の更新を繰り返すことで、大域的最適解への収束を期待する。最適化では目的関数がサンプルの良し悪しを決める基準となるので²⁾、TT がより小さな ρN 個の解を良解として採択する。解のサンプル生成数 N 、解の上位割合 ρ 、確率更新の繰り返し回数は、CE法の解の質や計算コストなどの性能に影響を与えるパラメータであるとされている²⁾。

4. 結果・考察

(1) 最適解の導出精度

以下の数値計算ではこれらのパラメータと解の精度について分析する。生成される全ての解 (ACの組み合わせ) を表-2に示す。5箇所の交差点のアクセスコントロール有無の組み合わせは $2^5=32$ 通りである。表より、TTが最小である解7 (接続点1, 2, 3をアクセスコントロールする戦略) が最適解であることがわかる。

モデルを10回実行し、そのうち最適解が導出された回数の割合を「的中率」と定義し、実数で表す。的中率は、CE法において設定する解のサンプル数 N と上位サンプル割合 ρ の値によって変化すると考えられるため、異なる

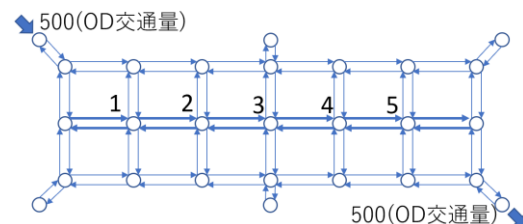
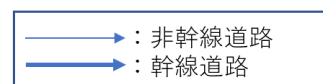


図-2 テストネットワーク (OD_1)

N, ρ に対する的中率を算出する. ρ は 0.4, 0.6 を設定し, 確率更新の際に採用する上位サンプル数 ρN が全体 N の半分より多いか少ないかが的中率にどのような影響が出るのかを見る. 表-3 に, 各 N, ρ に対する的中率を示す. 表より, サンプル数 N を増やすと的中率が改善されることがわかる. とくに N=30, 40 では, ρ の値によらず的中率 1.0 であった. このことから, 解の母数 32 個と同等かそれ以上のサンプル数 N があれば, 高い精度で最適解を導出できることがわかった. なお, 別の OD パターン(図-4~図-7)でも同様の傾向が得られた(表-4). 一方, N=20 以下では ρ ごとに的中率に違いが見られ, $\rho=0.4$ がより良好な中率を示した. 2章でも述べたように, CE 法では優良解(TT が小さい解)として採用した上位 ρN の解がより生成されやすくするように, 式(3-1)を用いて AC の生起確率を更新している. そのため, $\rho=0.6$ の場合, 相対的に TT が大きな解も含めて確率更新を行うため, 最適解から少し外れた解に収束しやすくなり, それが的中率の悪化に影響したと考えられる.

次に, 最適解に収束せず, 別の解が誤って導出された場合の当該解の良し悪しについても考察を加える. 的中率が 0.8 であった N=10, $\rho=0.4$ の下で得られた 10 個の解の内訳を調べると, [1, 2, 3, 4] が 2 回誤って最適解として導出されていることがわかった. 表-2 より, [1, 2, 3, 4] は全体で 2 番目に TT が小さい次善解であることがわかっている. このことから, 最適解に収束しない場合でもそれに準ずる良好な解が導出されることがわかる. このように, モデルの設定パラメータ N, ρ の値は, 的中率, 次善解等モデルの精度に影響を及ぼすことが確認できた.

前述の通り, 適切な N は当該問題の解の母集団サイズによって決まると考えられる. 本モデルを別のネットワークに適用するには, そのネットワークで導出される解の母集団サイズを確認し, それに基づいて N を決め, 次に N に従って ρ を決めるという順にパラメータ値を定めることで, 効率的に良好な解を導出できると考えられる.

(2) リンクフロー

最適解の下でのリンクフローについて分析する. 図-3 のように, OD_1 に対して [1, 2, 3] の連続した 3 点を AC する戦略が最適解として導出された. 交差点のうち, AC され

表-2 OD_1 における全ての組み合わせ

番号	AC される 組み合わせ	総所要 時間	順位
1	AC 無し	868.11	
2	[1]	862.02	
3	[1,2]	854.64	
4	[1,3]	854.32	5
5	[1,4]	860.62	
6	[1,5]	883.1	
7	[1,2,3]	845.98	1
8	[1,2,4]	852.44	4
9	[1,2,5]	877.02	
10	[1,3,4]	856.01	
11	[1,3,5]	874	
12	[1,4,5]	879.97	
13	[1,2,3,4]	848.79	2
14	[1,2,3,5]	866.64	
15	[1,2,4,5]	878.79	
16	[1,3,4,5]	875.94	
17	[1,2,3,4,5]	872.89	
18	[2]	859.27	
19	[2,3]	851.13	3
20	[2,4]	857.27	
21	[2,5]	878.18	
22	[2,3,4]	857.21	
23	[2,3,5]	873.8	
24	[2,4,5]	878.94	
25	[2,3,4,5]	882.3	
26	[3]	860.83	
27	[3,4]	863.49	
28	[3,5]	882.86	
29	[3,4,5]	887.53	
30	[4]	865.38	
31	[4,5]	888.14	
32	[5]	892.85	

※順位は上位 5 位のみ表示

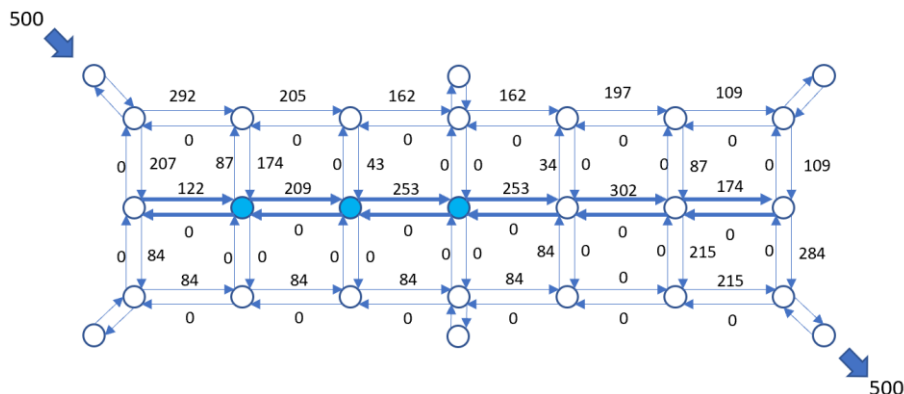


図-3 OD_1 リンクフロー

るものを青色で表している。2章でも述べた通り、ACを適用する交差点に接する幹線道路リンクの交通容量を増加させ、交通流動の改善を表現している。同じ図に、最適解に対するリンクフローを示す。

図-2 より、AC した場合でも左折による幹線道路への進入は可能である。OD_1 はネットワークの右下方向に流れる OD であるため、AC を適用した場合でも左折によって幹線道路に進入し、目的地に向かうことができる。一方で、AC された幹線道路からは右折によって非幹線に抜けることはできないため、目的地に近い交差点は AC されにくいものと考えられる。そのため、幹線道路中盤までは連続する接続点の AC による幹線道路の幹線性向上により、多くの交通量がさばかれ、幹線道路後半は目的地付近の交通量を複数リンクに分散して非幹線の負荷を軽減するために AC されなかったと考えられる。

5. おわりに

本稿では、交差点のアクセスコントロールの最適な組み合わせを求めるネットワーク計画問題の解を CE 法により求める際に設定するパラメータと精度の関係性、リンクフローの妥当性について議論した。

しかし、交差点数やネットワーク形状がどの程度であれば安定した解の導出が行えるのかについては未だ十分に検討できていない。加えて、アクセスコントロールする交差点の接続関係と容量設定について、本稿で対象とした中央分離帯以外の操作や、幹線道路の交通容量の設定についても議論の余地がある。なお、ネットワーク規模と計算量の関係については、別途に検討を進めている段階である。

謝辞:

本研究は、科学研究費(基盤研究 A : 17H01297)の助

成を受けた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 小池 卓武, 柳沼 秀樹: 道路階層化を念頭に置いたネットワークデザインモデルの構築, 土木計画学研究・講演集 Vol. 31, CD-ROM, 2018
- 2) 鶴川 翔平, 信田 龍哉, 橋本 昌則, 伊藤 雄一, 尾上 孝雄: クロスエントロピー法を用いたノード間距離所法に基づく 3 次元ノード位置推定, 情報処理学会研究報告・Vol. 2015-HCI-161, 2015
- 3) 武井 伸生, 長江 剛志: 道路ネットワーク耐震化戦略最適化のための便益推計手法 クロスエントロピー法, p.1-4, 2014.

(2018,7,31 受付)

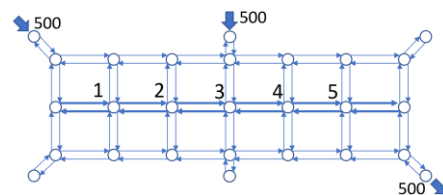


図-4 OD.2

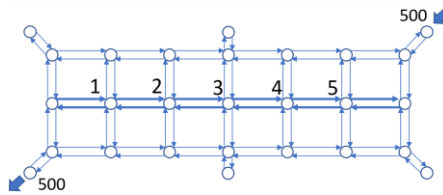


図-5 OD.3

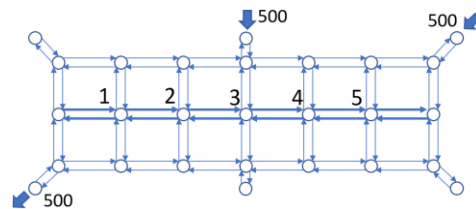


図-6 OD.4

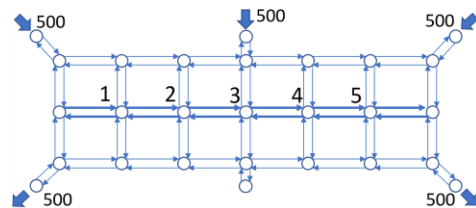


図-7 OD.5

表-3 的中率

N \ ρ	0.4	0.6
40	1.0	1.0
30	1.0	1.0
20	1.0	0.8
10	0.8	0.7
5	0.5	0.3

表-4 的中率(N=40, ρ=0.4)

OD	的中率
OD 2	1.0
OD 3	1.0
OD 4	0.9
OD 5	0.9

AN OPTIMAL ROAD NETWORK DESIGN MODEL CONSIDERING ACCESS CONTROLLED INTERSECTIONS

Takumu KOIKE, Wataru NAKANISHI, Hideki YAGINUMA and Yasuo ASAKURA

When designing a road network, it is important to consider reducing the total travel time in terms of enhancing transport performance of the network. In order to reduce the total travel time, access control of traveling direction at the intersection is reasonable.

We propose a network design model which derives the optimal combination of access control intersections. Cross Entropy method is applied to solve the network design problem. In this paper, we discuss the validity of the setting parameters of the model, the derivation accuracy of the solution and link flow.