

均衡配分法による道路網容量増強計画に関する研究

A Study On Planning Of Increasing The Road Networks Capacity By User Equilibrium Assignment

室蘭工業大学大学院	学生員	劉 斌	(Liu Bin)
室蘭工業大学大学院	学生員	阿部 裕子	(Yuko Abe)
室蘭工業大学工学部	フェロー	斉藤 和夫	(Kazuo Saito)
専修大学北海道短期大学	正 員	榎谷 有三	(Yuzo Masuya)

1. はじめに

交通ネットワークの解析は、道路網の計画、交通網改善の計画、ITS に代表される交通の高度情報化に伴う交通行動分析や需要予測、計画、評価などに欠かすことができない。特に、交通政策の評価と均衡制約付き最適化構造などに関する研究は、今後の応用ネットワーク均衡解析の分野で必要となると考えられる。

本研究においては均衡配分法によりネットワークの混雑箇所を発見し、その改良の効果と便益を算定し、改良の最適化計画を探索する方法について検討している。すなわち、(1) 均衡配分法で計画道路網の交通処理能力と混雑箇所を探索するアルゴリズムの開発、(2) 道路網の走行コストと道路網改良のコストを算定し、費用便益比を最大化する方法、(3) 改良後の道路網関数と費用便益比関数の行列作成、(4) 遺伝的アルゴリズムにする改良計画の最適化、である。

2. 最適改良による問題のモデル化

既存道路網の最適改良問題では、既存道路ネットワークにおいて、道路網容量の拡大と混雑を解消するために、すべてリンク L_i ($i=1, n$) に M 個 possible の改良組み合わせを作成し、効果的な改良スケジュールを求めることを考える。リンク改良評価項目としては、リンク改良のコスト、改良後ネットワークの走行時間、道路網容量の増大量、道路網改良の計画を対象とする。しかし、すべてのリンクを組み合わせると膨大な計算量になり、特に大規模ネットワークでは計算不可能の場合が考えられるので、それを避けるために、本研究では、均衡配分法により、道路網容量を規定する最小カットを探索する方法を開発し、道路網の混雑箇所を探索し、混雑リンクと組み合わせ、遺伝的アルゴリズムの成長法により最適化を行う。以上の繰り返しにより道路網改良の最適化計画に至達するまで計算を行うものである。計算の流れを図-1に示す。

(1) 均衡配分による道路網容量の計算

OD パターン一定の制約の下での道路網容量の算定手



図-1

法は、LP 法、カット法、配分シミュレーション法などが研究されてきた。本研究においては、OD 構成比一定の下で利用者均衡配分法を用いて道路網容量の算定を行う。利用者均衡配分法において総トリップを漸次増加させると道路網容量を規定する最小カットが発生するが、ここでは中値法 (二分法) を用いて繰り返し探索することにより最小カットが発生するときの配分交通量を求めることにする。

利用者均衡配分モデル条件下の均衡配分と最大交通量探索の問題は、以下のような数理計画問題として定式化される。

$$Q_n = \sum_{k \in K_n} f_k^n \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

$$X_a = \sum_{k \in K_n} \sum_{r \in R_n} \delta_{a,k}^r f_k^r \quad \dots \dots \dots (1.2)$$

$$\min Z_p = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

$$\sum_{a=1}^n KK_a \rightarrow \infty \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \dots \dots \dots (1.5)$$

x_a : リンク交通量

Q_n : OD 交通量

f_k^r : 経路交通量

KK_a : ネットワークの接続行列

計算のアルゴリズムは以下となる。

Step 1. OD 構成比のデータとネットワークデータを読み込む

Step 2. 最初の交通量を読み込み試算をする。

$$Q = X \sum_{i=1}^j m(i, j) \quad \dots \dots \dots 1.6$$

Q : 配分交通量

$m(i, j)$: OD 構成比

$x=0$ $Q=0$ として最初の均衡配分を行う

Step 3. $x_1=0$, x_2 を値を十分大きいに設定, $X=(x_1+x_2)/2$ として均衡配分を行う。

Step 4. 接続行列 $Sz(i, j)$ を作成する。Dijkstra 法における最短経路探索から、最短経路と接続行列を作成する。

Step 5. 道路ネットワークの接続性を判断する。

もしカットが発生すれば $x_2=X$ go to Step.3

もしカットが発生しなければ $x_1 = X$ go to Step.3

もし $|x_1 - x_2| < ?$ であれば Step. 7へ

Step6. 交換の行列を作成する。リンクの交通容量を超過するとき 1、超過しないとき 0 に置いて。

リンクに配分した交通量とリンクの交通容量の差の行列を作成する。

$$sa(i,j) = \{Lq(i,j) - Lc(i,j)\} \cdot \text{交換行列} \cdots (1.7)$$

ここで $Lq(i,j)$: リンク配分交通量

$Lc(i,j)$: リンク交通容量

$sa(i,j)$: 配分リンク交通量とリンク交通容量の差。

Step7. 探索の結果を出す。End

(2) 道路網改良投資と投資効果の定式化

道路投資による経済効果を、定量的あるいは定性的に計測することは難しいが、一般的には直接効果と間接効果に分けて考えている。本研究では、道路網改良後の容量の拡大効果と総走行時間など直接効果のみで、投資効果の評価を行う。投資のコストについては、道路網改良の距離と拡大の車線数のみを考える。したがって、道路網改良費用と改良効果は、以下のように定式化される。

$$C = C_s \cdot S \cdot N \cdots (2.1)$$

$$B = B_q \cdot T \cdot Q_1 + C_t \cdot Q_s \cdot (T_1 - T_2) \cdots (2.2)$$

現在価値の式で

$$C_1 = \sum_{t=1}^{T_2} \frac{C_t}{(1+r)^t} \cdots (2.3)$$

$$B_1 = \sum_{t=1}^{T_2} \frac{B_t}{(1+r)^t} \cdots (2.4)$$

もし $C_s = \theta B_q$ $C_t = \lambda B_q$ ならば

$$CBR = \frac{\sum B_1}{\sum C_1} = \frac{B}{C} = \frac{B_q T Q_1 - \lambda B_q Q_s (T_2 - T_1)}{\theta B_q S N} \\ = \frac{T Q_1 - \lambda Q_s (T_2 - T_1)}{\theta S N} \cdots (2.5)$$

ここで C : 道路網改良のコスト

C_s : 道路網改良の費用率 (万円/km)

S : 改良リンクの距離 (km)

N : 拡大の車線数

B : 直接投資効果

B_q : 交通量便益率 (円/年台)

T : 改良道路の寿命 (年)

Q_1 : 拡大の交通容量 (万台)

C_t : 走行費用率 (円/時間)

T_1 : 改良前の平均走行時間

T_2 : 改良後の平均走行時間

CBR : 費用便益比

θ : 道路網改良の費用率と交通量便益率の比

λ : 走行費用率と交通量便益率の比

(3) GA法で最適化の手法

遺伝的アルゴリズムは、1973年にミシガン大学のホーランドにより提案された手法で、その後様々な分野を応用された。遺伝的アルゴリズムの原理は、高い評価関数

をもつ解の近傍を中心とした、広域的な解探索にあるといえる。本研究の問題は本質的に不連続の最適化問題である。‘組み合わせの爆発’を避けるためにGAモデルを開発し、適用を行う。

本研究では、混雑リンク改良組み合わせを最適改良スケジュール問題としてGAを適用する。この問題は以下のように離散的組み合わせ最適化問題として定式化される。

$$\text{目的関数: } f(\{C_i\}) \rightarrow \min \cdots (3.1)$$

制約条件: 改良リンクの組み合わせ

$$L_i \in F$$

F : 改良リンク L_i ($i=1, n$) の全組み合わせ集合

$$F = n^n \cdots (3.2)$$

$$g_i(C_i) \leq 0 \cdots (3.3)$$

$$\text{設計変数: } \{I_i\} = \{I_1, I_2, \cdots, I_n\} \cdots (3.4)$$

この問題は、プロジェクト内の各改良リンクの制約があり、リンクの組み合わせの順番と探索計算を決定する問題として定議される。原問題は制約条件付きの最小化であるため、GA適用に際し逆数を取る方法で無制約問題に変換する。

$$\Phi(i) = f(\{C_i\}) + \gamma \sum_{m=1}^M \max[g_m, 0] \cdots (3.4)$$

$$CBR(i) = 1/\Phi(i) \cdots (3.5)$$

ここに、 γ : ペナルティ係数

m : 制約条件式の種類数

$CBR(i)$: 適応関数。

遺伝子線列構成は、構造的に制約条件を満足するように2進法コーディングを用いて行い、制約を満足する交叉・突然変異を行うことになる。全ノード間の改良リンクの有無を $\{0, 1\}$ のバイナリで表現する。道路ネットワークノード間リンクが存在する場合に1、存在しない場合は0になる。最適化探索のアルゴリズムは以下のようになる。

Step1. 初世代の生成。本研究では最初探索された最小カット構成リンクが初世代になる。ネットワーク初世代の遺伝子線列を生成する。

Step2. 適応度の評価。評価関数は道路網改良の費用便益比を用いて評価を行う。(式2.5と式3.6)

$$T_{平均} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n T_{i0} \{1 + \alpha (\frac{Q_i}{C_i})^\beta\} \cdots 3.6$$

Step3. すべてのリンクの組み合わせを探索したか?

道路網容量の最適化計画になるか? Yesで計算終了, NoでStep4へ。Yesの場合は評価結果あるいは評価値が最大の個体が最適解になる。

Step4. 適応関数により各固体の淘汰・繁殖を行う。

すなわち、適応度の大きいものは生き残る可能性が大きく、小さいものは生き残る可能性が小さいことになる。この選択の方法はトーナメント戦略を行うものである。その戦略は個体群の

中からあらかじめ決めた個数の個体をランダムに選択し、その中で適応度の高いものをトーナメント方式で選び次世代に残すというものである。本研究には、ランダムに個体を選ばずに個体群の中で最も適応度の高いものを強制的に残す。それはエリート戦略である。残りのリンクの組み合わせは、リンク交通容量増強する場合に生じる次のカットを構成するリンクを一つずつ組み合わせて次世代を繁殖する。

Step5. 残りの個体群の間で交叉し、次世代が生まれる。交叉するには、まず個体群の中から交叉を行う2つの個体を選び、この選択も乱数を用いてランダムに行う、個体群すべてについて交叉を行なうのではなく、その中の一部について交叉を行なう。本研究の交叉率を0.6として、二点交叉で交叉を行なう。それを図-2示す。

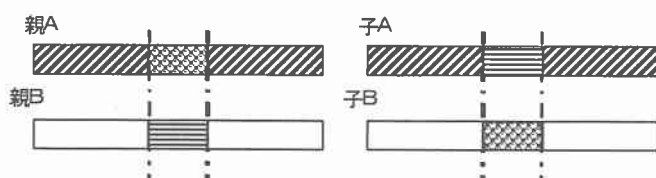


図-2

Step6. 突然変異を行う。突然変異は通常、遺伝子列の一つの要素を異なるもので置き換えることによって行う。すなわち、ある個体を選び、遺伝列が図-3に示すように、その中のある遺伝列を選び、その値が0であれば1に、1であれば0に書き換える。この突然変異を行う個体およびその遺伝子の場所も乱数で確率的に決定する。



図-3

以上に述べた本研究のプログラミングのフローチャートを示すと図-4のようになる。

3. 適用例

前節でモデル化した均衡配分法による道路網容量増強計画法のアルゴリズムを仮想道路ネットワークに適用した。この仮想道路ネットワークは、ノード数10、リンク数15の無向ネットワークであり、ネットワークデータを表-1と図-5に示す。

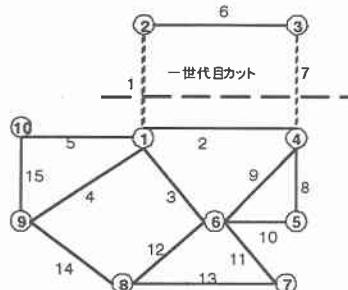


図-5

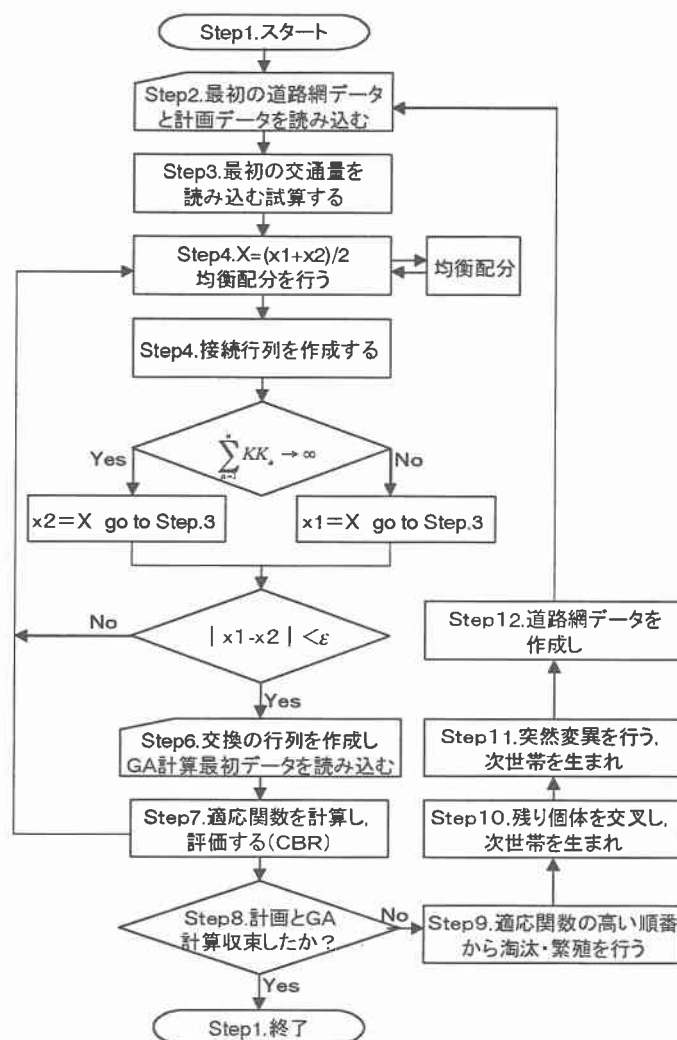


図-4

図-5中のリンク上の数字はリンク番号、表-1はOD構成比とリンク距離、また、すべてのリンクの交通量を12000台とし、式(3.6)の走行時間関数のパラメータを $\alpha=2.62$ 、 $\beta=5$ とする。式(2.5)の道路網改良費用率と走行時間費用率および交通量の便益率の比は $\lambda=0.6$ 、 $\theta=100$ とする。この道路網容量が11万台になる最適化計画を探索する。

表-1: 各OD交通の構成比各リンクの距離(m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0.095	0.077	0.095	0.084	0.104	0.056	0.014	0.017	0.005
2	500		0.038	0.022	0.012	0.013	0.006	0.000	0.024	0.001
3	∞	500		0.050	0.016	0.015	0.005	0.005	0.000	0.003
4	800	∞	300		0.029	0.022	0.007	0.004	0.020	0.001
5	∞	∞	∞	300		0.068	0.013	0.003	0.000	0.000
6	600	∞	∞	600	400		0.032	0.003	0.004	0.002
7	∞	∞	∞	∞	∞	200		0.013	0.005	0.001
8	∞	∞	∞	∞	∞	500	600		0.011	0.001
9	600	∞	∞	∞	∞	∞	∞	500		0.004
10	400	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	700	

計算の手順は以下ようになる。

Step1. 最初のカット探索。構成リンクは一世代目‘人口’になる。

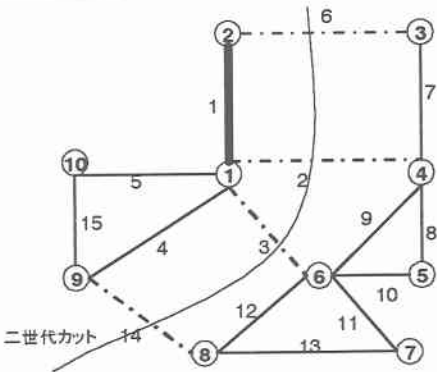
まず、二分法で道路網容量を規定する最小カットを探索し、図-5示すように、交通量71173台のとき均衡配分で道路網容量を規定する最小カットを発生した。

カット構成リンクであるリンク1とリンク7は一世代になる。2 進法コーディングは 000000000000001 と 000000001000000 になる。

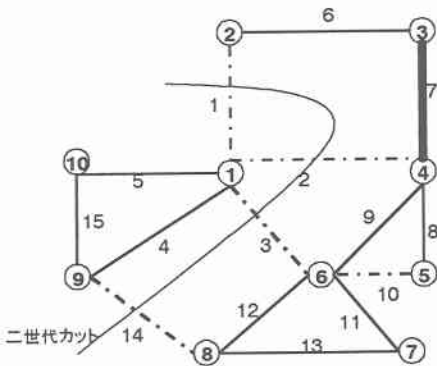
Step2. 適応関数の計算。一世代リンク1（親A）の交通容量を12000台に増強すると道路網容量は92336台になる。リンク7（親B）の交通容量を12000台に増強すると道路網容量は88847台になる。適応関数などを表―2に示し、二世代カットを図―6、図―7に示す。

表―2： 一世代関数

改良リンク番号	改良リンク容量	遺伝子列	改良リンクの距離(m)	平均走行時間(時間)	CBR	改良後ネットワーク交通容量
1	24000	000000000000001	500	2.217260825	3.40659397	92336
7	24000	000000001000000	300	2.438928261	4.17279212	88847



図―6



図―7

Step3. 収束判定を行なう。すべて探索した道路網容量が計画道路網容量になるかを判定する。本例ではまだ11万台にならないので、Step4へ。

Step4. 適応関数高い順番から繁殖・淘汰を行なう。一世代は二つしかない、エリート戦略で決定する数より少ないから、淘汰数は0になる。繁殖は親リンクを増強して得た二世代カット構成リンクを組み合わせる二世代を繁殖する。繁殖結果を表―3に示す。

Step5. 残り個体を交叉し、次世代が生まれる。一世代の個体が少ないことから0.6比率で、親Aと親B交叉を行なうと000000001000001遺伝子を持つ二世代子が生まれる。それを表―3に示す。

Step6. 突然変異を行い、次世代が生まれる。本計算例では親Bのはが突然変異を行うと000001001000000遺伝子を持つ二世代子が生まれる。それを表―3に示す。

表―3 繁殖・交叉・突然変異

	遺伝子列		遺伝子列
	親A 000000000000001	親B 00000001000000	
二世代 カット構成 リンク番	6, 2, 3, 14		1, 2, 3, 14
繁殖	A子1 00000000100001	B子1 00000001000001	
	A子2 000000000000011	B子2 00000001000010	
	A子3 000000000000101	B子3 00000001000100	
	A子4 010000000000001	B子4 01000001000000	
交叉	00000001000001		
突然変異	000001001000000		

以上の手順を繰り返して探索する。探索中の世代関数を表―4に示す。

表―4 各世代関数

世代数	改良リンク番号	改良リンク容量(万)	遺伝子列	改良リンクの距離(m)	平均走行時間(時間)	適応関数(CBR)	改良後ネットワーク交通容量(台)	淘汰	残り
二世代	1.2	2.4	00000000000011	1300	1.6847	1.955261	97841	yes	
	1.3	2.4	000000000000101	1100	1.6217	2.021788	94261	yes	
	1.14	2.4	010000000000001	1000	1.929	2.050599	94265	yes	
	1.6	2.4	000000000100001	1000	2.1761	2.363843	98994		yes
	7.1	2.4	000000001000001	800	2.1538	2.191681	92491		yes
	7.2	2.4	000000001000010	1100	2.2682	2.773928	106789		yes
	7.3	2.4	000000001000100	900	2.0544	2.135689	93669		yes
	7.14	2.4	010000001000000	800	7.6522	-1.54755	93444	yes	
	7.10	2.4	000001001000000	700	2.0116	1.747572	86198	yes	
	7.12	2.4	000000001000011	1600	2.2307	2.273725	112684	終了	
三世代	7.16	2.4	000000001100001	1300	2.0675	2.285406	104623		Yes
	7.13	2.4	000000001000001	1400	2.394	2.340891	110034	終了	
	7.23	2.4	000000001000310	1700	1.8477	2.054252	108543		Yes
	7.22	2.4	000000001000010	1900	1.7172	1.810237	107145		Yes
	7.28	2.4	000000001000010	1400	2.4085	2.347218	110229	終了	
	7.3.10	2.4	000001001000100	1300	2.789	2.563582	113467	終了	結果
	7.6.2	2.4	000000001100010	1800	2.1869	2.137866	114570	終了	
	7.6.3	2.4	000000001100100	1600	1.9932	2.186793	109590		Yes
	7.6.3.1	2.4	000000001100101	1900	2.8393	1.814962	115859	終了	
	7.6.1.1	2.4	000000001100001	1800	4.0775	1.204939	110071	終了	
四世代	7.6.1.14	2.4	010000001100001	1800	3.4536	1.657053	114630	終了	

本計算例の最適化計算結果ではリンク7, 3, 10のそれぞれを1.2万台に増強すると道路網容量が113467台になる。

4. あとがき

本研究では均衡配分法による道路網容量増強計画モデルを仮想道路ネットワークに適用した。この方法を実際の道路網容量増強計画に適用する場合、交叉点、大型車の混入率、投資の直接便益と間接便益などを考えなければならない。特に、ネットワーク計算と費用便益分析に使うパラメータ関数は、地方、時間価値、物価などによって異なる点も考慮しなければならない。

参考文献

- 1) 榎谷・十二里・田村・斉藤：カット探索手法の札幌都市圏道路網への適用。第19回交通工学研究発表会論文報告集、pp.141－144、1999
- 2) 劉斌・阿部・榎谷・田村・斉藤：札幌都市圏道路網を対象とした道路網感度分析。土木学会北海道支部論文報告集第62号、pp774－775、2001
- 3) 交通ネットワークの均衡分析―最新の理論と解法一、土木学会、1997
- 4) 川徐・多々納・岡田：費用便益分析指標を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法。土木計画学研究・論文集 Vol.18no.2、pp223－230、2001.
- 5) 古田・杉本：遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用、森北出版株式会社、1997.4
- 6) 中村英夫：道路投資の社会経済評価、東洋経済、1997.3