

# 交通ネットワークにおける 段階的整備プロセスの最適化

松中 亮治

交通プロジェクトは、ネットワーク外部性、不可逆性、長期性などの特徴を有しており、個々のプロジェクトの評価結果のみに基づいて、その段階的整備プロセスを最適化することはできない。本稿では、仮想的なネットワーク、ならびに、わが国の高速道路ネットワークを対象として、遺伝的アルゴリズムを適用し、最適なネットワーク整備プロセスを探索した結果を紹介するとともに、段階的整備プロセスを最適化することの重要性を指摘する。

キーワード：交通ネットワーク、段階的整備プロセス、プロジェクト評価、最適化

## 1. はじめに

現在、公共プロジェクトの妥当性・効率性を評価するために広く用いられている費用便益分析は、個々のプロジェクトの経済的効率性を評価するための手法であり、複数の代替案のなかから最適なプロジェクトを採択する、あるいは、プロジェクトの優先順位を決定することができる有用な手法である。

しかし、交通ネットワークを形成するために実施される個々のプロジェクトには、誘発交通を発生させ、後続プロジェクトの評価を大きく向上させる、あるいは、逆に、当該プロジェクトの代替路となるような後続プロジェクトの評価を大きく低下させるといった外部性が存在する。そのため、個々のプロジェクトの評価は、評価時点までに形成されたネットワークの形状により大きく異なる。また、一般に、交通ネットワークを形成する個々の交通施設の耐用年数は数十年と長く、ひとたびプロジェクトが実施され、ネットワークが形成されると、その影響は長期にわたって持続するという不可逆性を有している。

さらに、通常、ネットワークの形成には長期間を要し、プロジェクトの実施時期は時間軸上に広く分布しているため、評価の際には、社会的時間選好性を考慮し、各時点で発生する便益を社会的割引率を用いて現在価値に換算する必要がある。そのため、便益の発生時期によって計測される便益額も異なるものとなる。

したがって、ネットワークの段階的整備プロセス、

すなわち、プロジェクト実施順序が異なれば、ネットワークを形成する一連のプロジェクトによってもたらされる便益の総和である総便益も異なる結果となり、個々のプロジェクトを評価対象とする費用便益分析による評価結果のみに基づいて決定したネットワークの段階的整備プロセスは、必ずしも最適であるという保証はない[1~3]。

しかし、大規模かつ複雑化したネットワークにおいては、段階的整備プロセスのパターンはほとんど無数に存在するため、全てのパターンについてネットワーク全体の総便益を計測し比較することは、実際上不可能であり、効率的にネットワークの最適な段階的整備プロセスを探索する必要がある。

そこで、本稿では、複雑な離散型組合せ問題の効率的な解法である遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm) [4~7]を適用し、仮想的なネットワークを用いて、最適なネットワーク整備プロセスを探索した結果を紹介し、段階的整備プロセスを最適化することの重要性を指摘する[8]。さらに、実際のわが国の高速道路ネットワークを対象として、ネットワーク形成によってもたらされる総便益が、整備プロセスの最適化によってどの程度向上するかを実証的に計測した結果を紹介する[9]。

## 2. 遺伝的アルゴリズムの適用方法[2, 3]

遺伝的アルゴリズムの基本プロセスは、初期解集合の設定、評価・終了判定、遺伝演算の適用の三つから構成されている。以下、このプロセスに従い、ネットワークの段階的整備プロセス最適化問題への遺伝的アルゴリズムの適用方法について述べる。

まつなか りょうじ  
岡山大学 環境理工学部  
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

## 2.1 初期集合の設定

本稿で探索する解は、最適なネットワークの段階的整備プロセス、すなわち、プロジェクト実施順序である。そこで、各プロジェクトに一意のナンバリングを行い、各プロジェクトに付されたナンバーを遺伝子とする。そして、遺伝子を各遺伝子座に配することにより一つの個体を構成し、先頭の遺伝子座に置かれている遺伝子に該当するプロジェクトから順に実施するものとし、ネットワークの段階的整備プロセスを表現する。最適解の探索開始時には、ランダムに上記個体を複数生成し、初期集合とする。

## 2.2 評価・終了判定

本稿では、段階的整備プロセスの最適化基準として、次に示す全プロジェクト完了時の総純便益を用いる。そのため、各個体の遺伝情報に基づき、順にプロジェクトを実施する過程において、個々のプロジェクトによって発生する便益、料金収入、管理費等を逐次計測し、費用便益比が1.0以上であることをプロジェクトの実施条件とし、実施条件を満たす全プロジェクトが完了した時点で、その個体の総純便益を算出する。

$TENPV$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^{x_{k(i)}}} \\ \times \left( \sum_{t=0}^{d_{k(i)}+T-1} \frac{(UB_{t,k(i)} + SB_{t,k(i)}) - (C_{t,k(i)} + \Delta RC_{t,k(i)})}{(1+r)^t} \right)$$

ただし、

$TENPV$ ：総純便益

$t$ ：年次（建設開始年次を0とする）

$k(i)$ ： $i$ 段階目を実施されるプロジェクト

$n$ ：実施プロジェクト総数

$x_{k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  の建設開始年次  
(2000年を0とする)

$UB_{t,k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  によって発生する  $t$  年次の利用者便益

$SB_{t,k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  によって発生する  $t$  年次の供給者便益

$C_{t,k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  によって発生する  $t$  年次の建設費

$\Delta RC_{t,k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  によって発生する  $t$  年次の管理費増加額

$T$ ：評価対象期間

$d_{k(i)}$ ：プロジェクト  $k(i)$  の工期

$r$ ：社会的割引率

なお、終了条件としては、世代数を用いることとし、

世代数が条件に満たない場合は、次に述べる遺伝演算を適用し、解集合を更新する。

## 2.3 遺伝演算の適用

各個体の総純便益を適応度とし、次に述べる各遺伝演算を適用する。

### (1) 選択（再生）

計測した適応度をもとに、エリート保存選択ならびにルーレット選択[10]を用いて、次世代の親となる個体を選択する。

### (2) 交叉

選択された（個体群サイズ-1）個の親となる個体を対象として、コーディングを用いた一点交叉、サイクルクロスオーバーの2種類の手法[10]を適宜用いて交叉を行う。

### (3) 突然変異

親個体の染色体から二つの遺伝子座をランダムに選択し交換する方法を用いて、突然変異を行う。なお、突然変異確率は、個体群の多様性に応じて0.1~0.7の値を適宜用いることとした。

## 3. 仮想的なネットワークを対象とした段階的整備プロセスの最適化

### 3.1 前提条件

#### (1) 仮想ネットワークの形状

本節では、5ノード×5ノードの格子状の仮想ネットワークを用いて、このネットワークの全てのリンクが、プロジェクト実施前の段階においては一般道路であると想定し、それぞれのリンク上に高速道路を整備するプロジェクトを実施していくことにより、高速道路ネットワークを形成していく段階的整備プロセスを最適化する。なお、ネットワーク形成に伴う人口変化は考慮しないものとし各ノードの人口は、一律100万人、各リンクの長さは一律100kmと設定した。

#### (2) 便益計測方法[11]

プロジェクトによって発生する便益としては、所要時間の短縮のみを計測することとし、リンク一般化費用をもとに、各ノード間の最小一般化費用とOD交通量から、消費者余剰測度を用いて算出する。ここでは、各段階（一年）ごとに一つのプロジェクトを実施すると仮定し、社会的割引率（4%）を用いて整備プロセス開始時点における貨幣価値に換算し、実施された全プロジェクトによる総純便益を求めることとした。なお、リンク一般化費用は、走行速度、高速道路料金などを考慮し、プロジェクト実施前10,800円、プロジ

プロジェクト実施後8,400円と設定した。また、プロジェクト実施コストについては、一律5,000億円とした。

### (3) 需要関数

便益算出の際に用いる交通量を求めるために、本節では以下に示すグラビティタイプの需要関数を用いることとした。

$$D_{lm} = \alpha \cdot N_l^{\beta_1} \cdot N_m^{\beta_2} \cdot GC_{lm}^{\gamma}$$

ただし、

$D_{lm}$  : ノード  $l$  からノード  $m$  への交通量

$N_l$  : ノード  $l$  の人口 (=1,000,000人)

$GC_{lm}$  : ノード  $lm$  間の一般化費用

$\alpha, \beta, \gamma$  : パラメータ ( $\alpha=10000.00, \beta_1=\beta_2=1.00, \gamma=-3.00$ )

### 3.2 探索結果

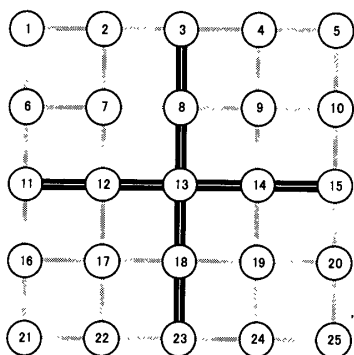
節3.1で述べた前提条件に基づいて、最適なネットワークの段階的整備プロセスを探索した。その結果を表1に示す。なお、表1には費用便益分析に基づく段階的整備プロセスについても併せて示している。なお、ここで、費用便益分析に基づく段階的整備プロセスとは、各段階において、費用便益比 (B/C) が最も高いプロジェクトから順に実施するプロセスである。

表1に示すように、費用便益分析に基づく段階的整備プロセスでは、37段階目に未実施の全プロジェクトの費用便益比が1.0を下回り、その段階でネットワークの段階的整備を終了した場合、総純便益は約54,627となる。引き続き、以降のプロジェクトを実施した場合、実施される全プロジェクトの費用便益比が1.0を下回るため総純便益は低下し、約54,547となる。一方、最適な段階的整備プロセスにおいては、35段階目に未実施の全プロジェクトの費用便益比が1.0を下回り、その段階での総純便益は約55,749と費用便益分析に基づくプロセスと比較して大きな値となる。さらに、費用便益比が1.0を下回る以降のプロ

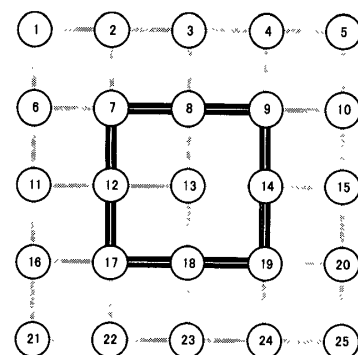
ジェクトを実施した場合、総純便益は約55,619と低下するものの、費用便益分析に基づくプロセスにおいて、費用便益比が1.0以上となることをプロジェクト

表1 段階的整備プロセス探索結果 (仮想ネットワーク)

段階	費用便益分析に基づく段階的整備プロセス		最適な段階的整備プロセス	
	実施プロジェクト	B/C	実施プロジェクト	B/C
1	16	2.092	15	1.984
2	25	2.217	24	2.102
3	7	1.871	30	1.894
4	34	1.883	29	1.958
5	20	1.602	26	1.773
6	19	1.819	17	1.943
7	21	1.671	11	1.787
8	22	1.844	12	1.895
9	11	1.496	13	1.604
10	12	1.548	10	1.609
11	6	1.508	33	1.609
12	8	1.508	31	1.609
13	24	1.508	25	1.430
14	26	1.508	16	1.481
15	28	1.500	7	1.472
16	31	1.502	34	1.466
17	15	1.411	28	1.441
18	10	1.442	6	1.438
19	17	1.411	8	1.436
20	13	1.445	35	1.439
21	29	1.347	23	1.279
22	33	1.437	14	1.331
23	30	1.424	27	1.279
24	35	1.449	18	1.331
25	1	1.227	5	1.283
26	4	1.229	32	1.287
27	32	1.227	9	1.284
28	36	1.227	36	1.287
29	2	1.083	20	1.029
30	3	1.141	21	1.081
31	23	1.075	2	1.029
32	14	1.092	3	1.081
33	27	1.075	38	1.029
34	18	1.092	39	1.081
35	38	1.029	1	0.980
36	39	1.081	4	0.983
37	5	0.983	19	0.980
38	9	0.983	22	0.983
39	37	0.980	37	0.980
40	40	0.983	40	0.983
総純便益 (全プロジェクト実施)	54,546.69		55,618.89	
総純便益 (B/C>1.0)	54,626.55		55,749.40	



費用便益分析に基づく段階的整備プロセス



最適な段階的整備プロセス

図1 整備プロセスの比較 (8期目)

の実施条件とし、36段階目でネットワークの段階的整備を終了した場合と比較しても、総純便益の値は大きくなっている。

また、両基準による段階的整備プロセスは、1段階目から異なるプロジェクトが採択され、全く異なる整備プロセスとなっている。最適な段階的整備プロセスにおいては、図1に示すように、初期段階において環状ネットワークが形成され、より適応度の高い、すなわち、純総便益が大きな段階的整備プロセスが整然と自己組織化されている様子が窺える。

以上のことから、費用便益分析に基づく段階的整備プロセスは、必ずしも最適な段階的整備プロセスとならないとはいえ、交通ネットワークの段階的整備においては、個々のプロジェクトの評価だけでなく、長期的にネットワーク全体を評価し、その段階的整備プロセスを最適化することが重要であるといえる。

#### 4. わが国の高速道路ネットワークを対象とした段階的整備プロセスの最適化

##### 4.1 前提条件

##### (1) 分析対象プロジェクト

本節では、2000年3月末現在供用されている高速自動車国道と本州四国連絡橋公団によって整備された一般国道自動車専用道路、計6,807kmを対象として、表2に示すように、61個のプロジェクトに集約し、最適な段階的整備プロセスを探索した。分析に用いた道路ネットワークを図2に示す。

##### (2) 便益計測

本節では、プロジェクト実施によって発生する利用者便益、および、供給者便益を計測することとした。なお、評価対象期間は50年とし、便益額は、社会的割引率(4%)を用いて、2000年時点の貨幣価値に換算した。なお、便益計測の際のゾーン区分としては、沖縄を除く45都府県と北海道を4ゾーンに分割した計49ゾーンを用いた。

##### (a) 工期の設定

プロジェクトの工期は、プロジェクトの実施に要する建設費によって決定するとし、各年次において使用できる建設費予算に制約を設け、各プロジェクトの工期を算出することとした。各プロジェクトの工期を算出する際には、複数のプロジェクトが同時に並行して実施されることはなく、一つのプロジェクトが完了した後、次のプロジェクトが実施されるとの仮定を置いた。そのうえで、各年次の予算制約のなかで、プロジ

表2 分析対象プロジェクト一覧

番号	道路名	区間	供用距離(km)	建設費(億円)
1	東北自動車道	青森～滝沢	157.4	4,195.2
2	八戸自動車道	安代～八戸	68.0	1,910.7
3	東北自動車道	滝沢～北上金ヶ崎	64.6	1,301.8
4	秋田自動車道	秋田北～北上JCT	123.2	3,126.0
5	東北自動車道	北上金ヶ崎～村田	147.2	2,789.6
6	山形自動車道	酒田～関沢、笹谷～村田JCT	130.5	4,014.9
7	東北自動車道	村田～郡山	95.7	1,443.0
8	東北自動車道	郡山～宇都宮	113.4	1,939.5
9	磐越自動車道	郡山JCT～いわきJCT	72.9	1,441.5
10	磐越自動車道	新潟中央JCT～郡山JCT	142.1	4,821.3
11	東北自動車道	宇都宮～川口JCT	105.0	2,955.5
12	常磐自動車道	水戸～三郷JCT	82.0	5,657.5
13	常磐自動車道	いわき四倉～水戸	105.9	3,829.6
14	東関東自動車道	潮来～市川JCT	113.3	7,375.3
15	関越自動車道	前橋～練馬	91.1	6,778.3
16	関越自動車道	長岡～榑橋	154.4	7,594.0
17	上信越自動車道	更埴JCT～藤岡JCT	119.0	6,709.9
18	中央自動車道	高井戸～甲府南	128.1	7,977.5
19	中央自動車道	甲府南～岡谷	80.4	2,432.0
20	上信越・長野道	岡谷～上越JCT	160.2	7,064.0
21	北陸自動車道	上越JCT～新潟空港	135.3	5,729.0
22	東名高速	東京～沼津	103.3	2,876.5
23	東名高速	沼津～浜松西	137.2	3,810.6
24	中央自動車道	岡谷JCT～小牧JCT	162.5	4,879.8
25	名神高速	小牧～米原JCT	56.7	1,227.3
26	東名阪・伊勢道	名古屋～伊勢	160.3	7,507.2
27	東海北陸自動車道	一宮JCT～飛騨清見	144.6	6,765.5
28	北陸自動車道	五箇山～砺波小矢部JCT	184.2	4,673.5
29	北陸自動車道	金沢東～米原JCT	171.2	7,033.7
30	名神高速	米原JCT～西宮	130.7	2,948.5
31	近畿・阪和・関空道	吹田JCT～海南	107.2	8,813.2
32	中国自動車道	泉佐野JCT～りんくうJCT	118.5	2,668.2
33	中国自動車道	吹田JCT～佐用	87.0	2,668.2
34	山陽自動車道	舞鶴東～吉川JCT	87.0	3,225.2
35	山陽自動車道	神戸JCT～山陽姫路西	62.7	2,616.7
36	山陽自動車道	山陽姫路西～倉敷	89.7	4,287.2
37	岡山自動車道	北房JCT～岡山JCT	43.8	1,070.8
38	山陽自動車道	倉敷～広島東	126.7	6,874.6
39	中国自動車道	佐用～北房	74.2	1,556.7
40	米子自動車道	落合JCT～米子	66.5	1,626.7
41	山陽自動車道	広島東～廿日市	132.2	7,018.0
42	中国自動車道	大竹～山口JCT	137.3	2,542.2
43	中国自動車道	北房～千代田JCT	144.3	4,838.9
44	中国自動車道	千代田JCT～山口JCT	78.4	1,782.7
45	九州自動車道	山口JCT～新門司	91.5	3,211.8
46	九州自動車道	新門司～鳥栖JCT	107.8	3,735.8
47	九州自動車道	鳥栖JCT～長崎多良見	178.4	6,084.5
48	九州自動車道	鳥栖JCT～えびの	71.8	1,742.0
49	宮崎自動車道	えびの～鹿児島	80.5	1,579.1
50	大分自動車道	えびのJCT～宮崎	145.1	5,679.7
51	高松・松山道	大分宮内～鳥栖JCT	183.6	8,682.4
52	高知・徳島道	伊野～川之江JCT	164.0	8,130.1
53	高知・徳島道	川之江東JCT～徳島JCT	73.9	1,972.3
54	瀬戸自動車道	浜田～千代田JCT	44.3	7,602.6
55	瀬戸自動車道	広島北JCT～広島JCT	98.6	14,978.5
56	西瀬戸自動車道	倉敷JCT～坂出JCT	105.4	2,961.0
57	西名阪自動車道	三木JCT～鳴門	46.6	7,500.0
58	西名阪自動車道	西瀬戸尾道～今治南	27.2	1,756.5
59	道央・札幌道	松原JCT～天理	29.3	7,538.5
60	道央自動車道	大泉JCT～三郷JCT	163.6	6,094.4
61	道東自動車道	旭川鷹栖～札幌	193.8	5,333.0
		札幌～小樽	92.4	1,910.2
計			6806.7	278,222.1

クトを実施し、余剰金があれば、それを次のプロジェクトの実施費用に充当できるとし、予算が不足する場合には、翌年も引き続き当該プロジェクトが実施されるものとした。

##### (b) 利用者便益

利用者便益としては、所要時間短縮便益ならびに走行費用減少便益の2項目を計測することとし、消費者余剰測度によって算出した。

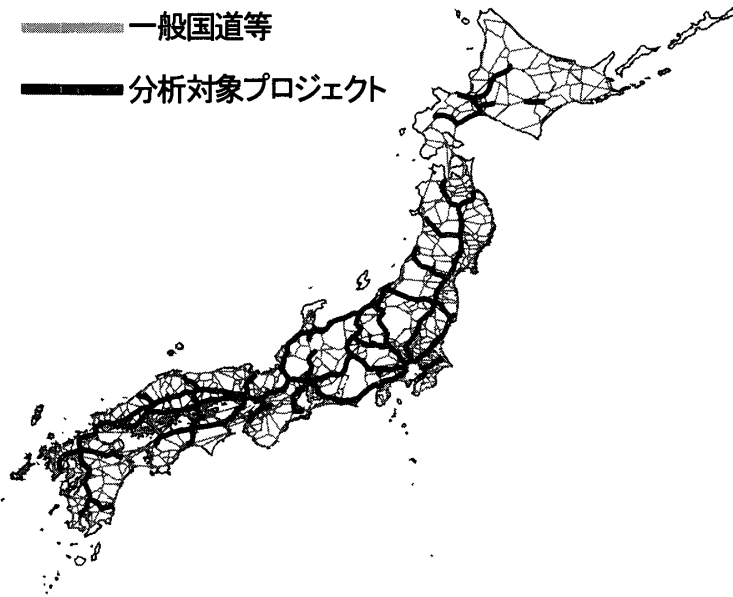


図2 分析に用いた道路ネットワーク

(c) 供給者便益

供給者便益としては、プロジェクト実施による高規格幹線道路網全体の料金収入の増加額を計測した。

(d) 費用

費用としては、建設費（用地費を含む）、および、プロジェクト実施による高規格幹線道路網全体の管理費の増加額を計測した。

(3) ゾーン間一般化費用の計測

(a) 需要関数

本節では、都市圏内々交通にかかわるODと、それ以外のODの2種類について、道路交通センサ自動車起終点調査[12]による、1985年、1990年、1994年のOD交通量、人口データ、ゾーン間一般化費用を用いて、次式に示す需要関数を推定した。ここで、都市圏内々とは首都圏1都7県内々および近畿圏2府4県内々のトリップを指す。

$$D(GC_{i,j}) = \alpha \cdot POP_i^{\beta_1} \cdot POP_j^{\beta_2} \cdot GC_{i,j}^{\gamma} \cdot e^{\lambda \delta_{i,j}}$$

ただし、

$D(GC_{i,j})$  : ゾーン  $i$  から  $j$  への交通量

$GC_{i,j}$  : ゾーン  $ij$  間の一般化費用(円)

$POP_i$  : 都道府県  $i$  の人口(人)

$\delta_{i,j}$  : 青函ダミー（青森-函館間を通過するODペア：1)

(b) 交通量配分

推定したOD交通量を各リンクに配分する際には、比較的計算が簡便な分割配分法を用い、リンク交通量を計測した。ただし、分割配分の対象は高速道路のみ

表3 段階的整備プロセス探索結果  
(高速道路ネットワーク)

プロセス	実施プロジェクト数	供用延長 (km)	総純便益 (兆円)	比率
費用便益分析に基づく段階的整備プロセス (B/C ≥ 1.0)	42	4,451.2 km	89.56	1.221
最適な段階的整備プロセス (全プロジェクト実施)	61	6,806.7 km	88.21	1.202
実際の段階的整備プロセス	45	4,798.5 km	111.57	1.521
実際の段階的整備プロセス	61	6,806.7 km	73.37	1.000

とし、一般道路については、リンク交通量として、道路交通センサ一般交通量調査（1994年）[12]の24時間交通量を用いることとした。

(c) ゾーン間一般化費用

計測したリンク交通量より求めたリンク一般化費用を用いて、ゾーン間の最小一般化費用を計測した。そして、計測したゾーン間一般化費用から需要関数を用いてOD交通量を推定し、分割配分法の初期値として用いたOD交通量との誤差が1%未満になるまで繰り返し計算を行いゾーン間一般化費用の収束値を求めた。

4.2 探索結果

節4.1で述べた前提条件に基づいて探索したわが国の高速道路ネットワークの最適な段階的整備プロセス、費用便益分析に基づく段階的整備プロセス、ならびに、実際の整備プロセスについて、実施プロジェクト数、供用延長、総純便益の計測結果を表3に示す。

実際の整備プロセスでは、表3に示すように、61プロジェクトが全て実施され、約6,807kmの高速道路が供用されるが、費用便益比(B/C)が1.0以上となることをプロジェクトの実施条件とすると、費用便

益分析に基づく段階的整備プロセスならびに最適な段階的整備プロセスでは、それぞれ、42プロジェクト、約4,451 km (全プロジェクトの65.4%)、45プロジェクト、約4,799 km (全プロジェクトの70.5%)が、実施された段階で、残り全てのプロジェクトの費用便益比が1.0未満となり、ネットワーク整備が完了する。その結果、表3に示すように、総純便益は、実際のプロセスでは、約73.4兆円、費用便益分析に基づく整備プロセスで約89.6兆円、最適な段階的整備プロセスで約111.6兆円となる。費用便益分析に基づく整備プロセスにおいて、プロジェクトの実施条件を設定せず全てのプロジェクトを実施した場合も、総純便益は約88.2兆円となり、実際のプロセスと比較して約20%大きな値となる。

また、表3に示すように、最適な段階的整備プロセスの総純便益が、費用便益分析に基づく整備プロセスと比較して、約24.5%も大きな値となっていることから、プロジェクトの実施順序がネットワーク全体の総純便益に与える影響は非常に大きなものであり、交通ネットワークの段階的整備においては、どのプロジェクトを実施するかだけでなく、いつプロジェクトを実施するのかも含めた整備プロセスの決定が非常に重要であるといえる。

ただし、ここで紹介した結果は、節4.1で述べた前提条件に大きく依存している点に留意する必要がある。本稿では、紙面の都合上、前提条件については、必要最低限の記述に留めており、より詳細な前提条件ならびに分析結果については、文献[8, 9]を参照されたい。

## 5. おわりに

本稿では、交通ネットワークの段階的整備プロセスの最適化問題をとりあげ、その解法として遺伝的アルゴリズムを適用し、仮想的なネットワーク、ならびに、わが国の高速道路ネットワークを対象として、最適なネットワーク整備プロセスを探索した結果を紹介した。

本稿で示したように、ネットワーク外部性、不可逆性、長期性などの特性を有する交通プロジェクトによって形成される交通ネットワークにおいては、段階的整備プロセス全体を長期的に評価し、最適化すること

が非常に重要であるといえる。

また、このような交通ネットワークの段階的整備プロセス最適化問題の解法として、遺伝的アルゴリズムは非常に有効であり、その適用により効率的に最適なプロセスを探索することが可能となる。

## 参考文献

- [1] R. Matsunaka, Y. Aoyama and D. Nakagawa, "An optimization of the construction/improvement process of the urban road network using a Genetic Algorithm", 7th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, CD-ROM, 2001.
- [2] 青山吉隆, 松中亮治, 野村友哉, "大規模高速道路ネットワークの段階的整備プロセスの最適化手法とその応用", 運輸政策研究, Vol. 5, No. 2, pp. 2-13, 2002.
- [3] 青山吉隆, 松中亮治, "全国高速道路網の整備順序と最適ネットワーク—ネットワーク・シミュレーションによる評価—", ITPS Report 20021, 運輸政策研究機構, 2002.
- [4] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Univ. of Michigan Press, 1975.
- [5] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.
- [6] Yuval Davidor, "GENETIC ALGORITHMS AND ROBOTICS", World Scientific Publishing, 1991.
- [7] 北野宏明(編), "遺伝的アルゴリズム4", 産業図書, 2000.
- [8] 松中亮治, "地域間交通ネットワークの評価と段階的整備計画に関する研究", 京都大学学位論文, 2002.
- [9] 松中亮治, 柚木俊郎, 青山吉隆, 中川 大, "わが国における高速道路ネットワークの段階的整備プロセスの事後評価", 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 1, pp. 33-42, 2003. 9.
- [10] 電気学会 GA 組合せ最適化手法応用調査専門委員会編, "遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークスケジューリングと組み合わせ最適化—", コロナ社, 1998.
- [11] 道路投資の評価に関する指針検討委員会編, "道路投資の評価に関する指針(案)", 財団法人日本総合研究所, 1998.
- [12] 建設省道路局(編), "道路交通センサス", 1985, 1990, 1994.