

(11) GAによる高速道路網の新設路線工事の順位決定について

Application of GA to Determining Priority of Newly Constructed Routes
in Highway Network

杉本博之*・田村亨**・長濱裕朗*

Hiroyuki SUGIMOTO, Tohru TAMURA, Hiroaki NAGAHAMA

GA applies to determining the priority of newly constructed routes projected in Metropolitan Expressway. The daily traffic snarl in Metropolitan Expressway has been a serious problem in these years. As the counterplan for that, the newly constructed outer loop expressway is projected. It will take several tens of years to complete the construction, so the priority of the newly constructed routes is the important problem to get the high performance of whole highway network during the construction. The problem is formulated as 41 nodes, 133 links and 48 construction routes problem, and GA applies to this problem successfully.

Keywords: GA, construction priority, highway network, Metropolitan Expressway

1. まえがき

東京、大阪等大都市圏における交通渋滞は年々深刻なものになってきており、利用者にかかる時間的、精神的負担は計り知れないものになっている。

現在、首都高速道路は共用延長220km、利用台数は1日平均約110万台を越え、首都圏における自動車交通の大動脈になっている。しかし、年々増加する交通量に対し、ネットワークの整備が不十分であることから、日常的に渋滞が発生していることは周知のことである。特に都心ほどひどい渋滞が起きている。この主要因は、都心環状線に交通量の大きな高速道路が集中していることと、首都高速道路東京線を利用する約94万台/日の約48%が都心環状線に集中することにある。しかし、その都心環状線に集中する交通の約半数の23～24万台/日は、単にその路線を通過するだけである¹⁾。この単に都心環状線を通過するだけの交通量を新設路線によって都心環状線から分散させれば、都心環状線を中心とした交通渋滞は大幅に緩和されると考えられる。

その時間問題になるのが、新設路線の工事順位である。完成系は工事順位に当然関係なく、工事期間が短ければ、工事順位の影響はほとんどでないと思われるが、首都高速道路の場合、完成までに数十年はかかると考えられ、その間の利用者にかかる負担を最小限（費用便益比を最大限）にしようとするれば、その工事順位は大きな影響があると考えられるからである。

比較的大規模（17ノード、41リンク、20工事区間）な仮想道路ネットワーク上の工事順位決定問題にGAを応用し、悪い順位と良い順位の間には数倍の費用便益比の差があることは、すでに報告されている²⁾が、組み合わせ最適化問題^{3) 4) 5)}のみならず、順位付け問題もGAの有効な応用例と考えられる。

本研究は、首都高速道路の新設工事順位決定問題にGAを応用し、その最適化手法としての有効性、信頼性について検討することを目的とし、41ノード、133リンク、48工事区間としてモデル化した問題を数値計算例として示す。

OD表等のデータは、第20回首都高速道路交通起点終点調査報告書〔平日編〕（調査日：平成2年10月18日（木）～19日（金）、首都高速道路公団）を用いている。

* 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)
** 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)
+ 日本工営福岡支店 (〒812 福岡市博多区住吉4-3-2)

2. 首都高速道路網のモデル化

一般に交通計画を立てるためには、対象地域を幾つかのゾーンに分け、ゾーンに発生・集中する交通は、ゾーンの中心からすべて発生すると考える。このゾーンの中心をノード、ノード間を結んだ交通路（路線）をリンクと呼ぶ。本研究では、高速道路を対象とするため、出入口であるランプをいくつかまとめたものをゾーンとして、そこに一つのノードを当てはめる。首都高速道路と連結している東名、中央、関越、東北、常磐、京葉、および東関東など他の7つの自動車専用道路は、首都高速道路との合流点を1つのゾーン（ノード）と仮定し、結局、図-1のようなネットワーク図を作成した。また、ノード番号とゾーン領域の関係を表-1に示している。図中、実線の平行線が既設の路線（52路線）であり、上下線を表す。点線の平行線が新設の路線（15路線）である。新設路線は、その建設に要する建設費に応じて細分されている。二重丸で示されたノード番号は、上記の他の自動車専用道路と首都高速道路の合流点を表す。

本研究は、新設される道路によって生じる交通量配分の変化が重要であり、総走行時間最小の経路に交通が配分されるプロセスの最適化も行っている。ここでは、文献1)のランプ間のOD表を参考にして各ゾーン間の発生交通量と集中交通量を求め、表-2のようなOD表を作成した。関越道（ゾーン40）については、東北道と中央道の交通量を参考にして交通量を推定した。

3. 等分割配分法

本研究において、各路線における交通量と車両速度との関係は、図-2のように仮定されている。図中の Q_0 、 V_1 、 V_2 、および V_3 は各路線毎に与えられるものとする。表-2のOD表に示された交通量は、図-2の $Q-V$ 関係を利用して配分が決められる。

ネットワークへの交通量配分は、最短経路への等分割配分法で行うこととする。

その手順は、以下のようになる。

- 1) OD表の各ゾーン間の交通量を、設定した分割数 m （本研究では5）で分割し、分割OD表を作成。
- 2) 現在の交通量に対する車両速度を図-2により求め、すべての起終点ゾーン間の最短時間経路を求め、分割したOD交通量をこれに分配し、すでに分配されている交通量に加える。
- 3) 上記2)の手続を m 回繰り返して、すべての起終点ゾーン間の配分交通量を求める。

ここで、最短時間経路は、全ての可能な経路を検討しなければならないが、計算処理時間の関係から、一对の起終点ゾーン間で、1～8種類の路線に特定し、その中で比較により最短時間経路に替えている。

例えば、ゾーン3からゾーン35（扇大橋～小菅から大黒埠頭）であれば、[3-8-20-23-33-34-35]、[3-7-9-20-23-33-34-35]、[3-7-9-21-41-22-32-33-34-35]、および[3-7-9-21-41-22-32-35]の4路線のみを比較検討し、その中の最短時間経路を求めている。

4. 目的関数

本研究の目的は、首都高速道路網の新設路線の開通順序を最適化することにより、建設期間中の交通の流れをできるだけスムーズにしたいということにあるので、目的関数としては、次式に定義する費用便益比を取り、その最大化を図った。本研究の費用便益比は以下のように定義される。

$$\text{費用便益比} = \left[\sum_{k=1}^n \{ (\text{工事開始前の走行時間費用}) - (k \text{ 年度の走行時間費用}) \} \right] / \text{総工事費} \quad (1)$$

走行時間費用は、次式で計算される。

$$\text{走行時間費用} = \sum \{ (ij \text{ ゾーン間の所要時間}) \times (ij \text{ ゾーン間の年発生交通量}) \times (\text{時間費用}) \} \quad (2)$$

ここで、 n は費用便益比を検討する年数であり、工事完了予定年度より大きく取られる。時間費用は、1時間1台当たりのコストであり、本研究では、1800（単位/時間・台）としている。

5. 遺伝的アルゴリズム (GA)

本研究で用いたGAは、繁殖・淘汰、交叉、および突然変異からなる単純GAであり、本研究のようなスケジューリング問題の為にすでに発表してあるもの²⁾と同じであるので説明は省略する。

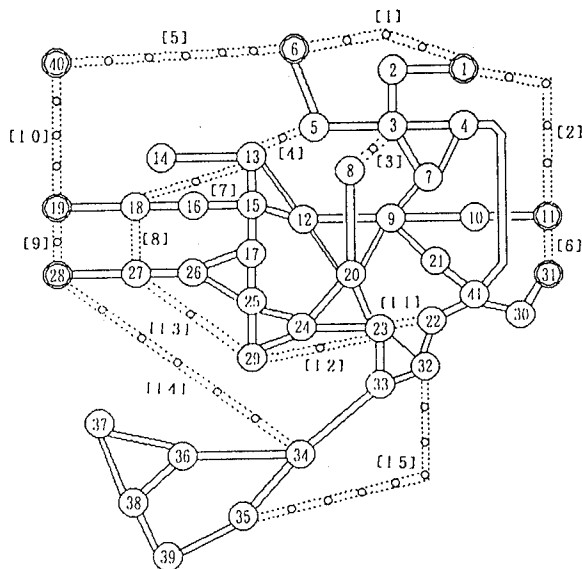


図-1 首都高速道路ネットワーク図

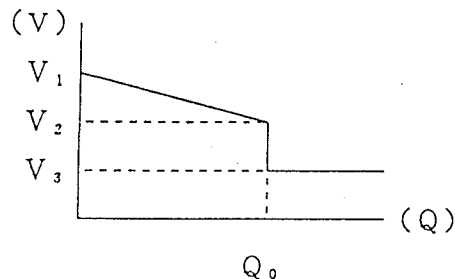


図-2 Q-V曲線

表-2 OD表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
1	0258	2681	26317	50423	0	45	1	1	63	33	21	5	40	24	65	143	87	32	20	24	18	3	27	52	12	74	84	55	32	59	32	33	22	33	4	44	97	149					
2	309	0	165	93	198	123	34	69	0	40	0	2	45	25	7	2	28	23	44	69	94	50	26	22	21	6	22	48	12	73	104	12	62	29	50	48	19	19	2	8	96	236	
3	252	211	0	30	18	228	33	0	8	0	4	4	3	4	1	8	3	9	16	13	16	31	8	3	0	5	7	19	14	98	12	71	20	20	9	8	6	7	1	12	15	124	
4	178	132	18	0	18	42	18	4	0	2	2	7	5	5	4	11	4	22	33	8	8	14	10	8	5	4	17	38	24	16	29	22	24	28	20	10	13	16	9	20	126	36	
5	295	158	151	143	0	61	82	16	1	25	1	5	9	7	0	2	7	9	24	29	44	47	23	9	2	6	19	65	26	23	31	52	94	35	33	16	10	6	3	18	32	127	
6	47	98	315	198	447	0	25	7	1	44	0	9	18	8	4	3	17	7	14	61	43	27	24	24	13	2	13	35	195	43	15	33	26	237	62	54	34	31	27	3	58	312	26
7	327	449	23	720	201	0	0	1	0	0	1	3	1	8	0	0	0	3	5	2	0	5	2	2	2	2	2	2	4	10	17	5	41	41	18	3	3	0	17	3	0	310	21
8	0	2	0	0	0	2	1	0	0	0	2	3	0	2	6	1	38	5	88	10	132	1	0	109	66	38	140	26	93	79	535	0	0	1438	43	18	81	75	22	54	52	0	
9	204	277	61	26	16	103	15	0	0	79	418	1	65	88	15	36	2	58	61	8	3	9	7	3	3	26	37	77	87	89	130	21	30	12	11	9	15	5	19	82	45		
10	2	1	0	0	0	0	0	0	0	16	1078	22	49	58	1	24	8	61	61	33	0	0	5	11	6	17	47	83	53	2	2	11	24	6	7	5	14	3	8	31	2		
11	2	1	2	1	2	3	11	1	76	1032	0	163	213	200	14	105	57	122	19	1208	5	0	18	39	17	64	71	202	90	0	0	7	17	4	4	11	13	3	10	97	0		
12	15	11	42	23	20	50	74	19	101	4	74	340	0	315	476	2132	10	207	177	10	15	35	15	3	1	43	96	114	911	43	209	1	71	10	8	9	18	6	15	126	87		
13	25	11	6	9	4	5	3	0	6	25	112	21	0	1312	0	4	22	30	46	41	9	13	17	11	0	15	31	67	89	29	56	1	48	9	3	9	9	3	12	26	37		
14	14	14	3	9	1	0	17	3	61	68	173	121	1090	0	2	24	157	14	83	228	67	42	78	53	9	54	114	35	82	18	71	113	3222	49	29	33	24	11	39	43	65		
15	1	2	0	0	0	1	1	2	1	1	2	1	3	2	0	104	2	264	248	1	0	0	4	8	0	31	190	25	194	1	1	0	28	8	1	4	8	3	8	125	2		
16	32	57	7	18	4	10	7	5	12	34	90	9	8	34	0	0	49	354	366	14	15	7	3	13	0	5	4	37	32	32	56	0	39	8	8	12	12	4	11	188	24		
17	45	48	17	18	17	12	3	3	2	21	81	7	124	228	0	191	0	501	311	8	5	5	7	4	0	984	125	2940	28	60	1	64	7	4	10	24	9	21	162	16			
18	56	28	12	14	11	17	26	19	33	56	96	60	21	12	32	2264	0	1459	79	28	12	19	40	1	6	2	5	22	42	68	0	45	3	3	2	0	0	7	738	30			
19	138	53	16	34	33	75	20	37	51	76	148	54	63	73	484	74	195	1023	0	84	65	19	46	38	0	8	2	3	58	63	134	3	84	7	5	2	3	3	38	53			
20	87	138	28	19	50	58	19	140	0	70	162	2	116	189	1	82	1	130	86	0	1	2	39	3	5	80	22	32	68	174	67	97	1258	77	42	118	136	381	71	72	38		
21	29	45	14	2	28	29	0	0	1	1	13	2	54	118	0	27	1	58	74	0	0	10	2	0	0	5	24	60	22	23	43	221	77	26	15	4	9	17	3	16	52	108	
22	21	50	17	17	40	30	3	0	0	4	1	3	28	30	0	6	0	16	12	4	0	0	11	2	2	2	4	15	30	6	49	54	580	32	38	12	28	41	4	22	21	38	
23	17	21	6	7	11	19	4	4	1	5	20	13	3	72	109	3	28	4	29	54	13	2	3	0	0	2	6	15	57	0	0	5	38	17	8	34	31	9	32	37	2		
24	23	26	6	4	7	14	3	28	2	15	33	4	43	93	3	38	2	98	72	2	2	0	1	0	1	16	91	138	93	14	25	0	65	14	9	24	36	8	42	43	5		
25	13	8	1	8	4	2	0	9	3	11	4	0	1	0	0	0	0	1	1	6	0	0	0	0	5	0	199	6	8	0	89	8	5	23	26	8	32	2	7				
26	30	42	20	24	15	21	19	80	19	43	71	30	59	112	15	5	81	9	21	130	9	3	12	23	0	0	0	15	34	50	0	59	4	2	9	3	3	6	21	21			
27	75	78	23	28	25	33	22	106	31	86	97	63	108	100	54	12239	4	5249	31	2	17	86	0	81	0	890	14	44	72	0	29	0	0	1	1	0	1	19	40				
28	226	138	25	31	69	244	33	105	53	104	221	52	138	253	57	36264	4	2300	61	1	37	97	323	293	0	44	98	164	2	49	4	0	1	0	0	0	0	2123	49				
29	126	114	36	45	77	93	42	253	84	112	111	83	271	309	52	78231	51	100479	19	3	6	71	96	8	17	68	0	26	49	0	35	3	1	5	6	0	12	97	24				
30	92	74	67	19	196	168	51	1	125	1	0	45	66	79	2	39	15	51	74	83239	56	38	19	11	18	39135	45	0	166	35	2101	62	46	29	36	8	501	21344					
31	47	113	112	34	22	301	38	0	56	6	1	73	96	108	6	69	29	78	158100	293	72	36	28	14	37	68204	51	116	0	35	2114	85	48	52	43	8	802	29585					
32	173	184	65	191	158	148	26	4	6	19	8	2	10	15	2	3	0	6	5	114	348	0	0	0	0	1	5	143	901	0	2	0	2	2	0	0	1	77471					
33	75	109	19	45	60	97	28	13	25	56	28	39	197	279	19104	67	77	133383	41	40	88	61	53	47	28	41	2	21001	154	9	0	18621	722	2247	6625	11	15102						
34	73	48	15	50	58	116	10	23	5	9	7	5	21	53	10	16	11	7	14	41	30	53	31	13	8	13	2	5	121	29154	4108	0	220	17045	321	3963	65	89					
35	30	20	11	14	11	36	0	5	4	3	0	1	4	15	0	2	1	1	2	8	10	13	6	1	8	0	0	0	3	56	64	0	94146	0	7	56	62	74	19	12			
36	36	32	12	42	20	38	6	25	11	11	2	3	12	29	5	4	7	5	244	22	17	22	7	7	5	0	2	5	53	72	20	67	131	10	0	37	121	3512	20	25			
37	48	31	8	33	23	61	10	25	5	13	5	8	23	26	1	4	8	1	244	51	48	60	21	23	5	0	2	1	76126	81495	121	30388	0	698738	32	79							
38	8	13	0	8	6	14	4	8	3	6	2	6	7	14	3	6	3	3	11	14	11	18	5	7	5	0	1	3	17	24	0	57	199	8243654	0	117	9	15					
39	40	24	10	21	15	60	18	19	8	6	3	6	16	19	1	9	15	2	5	66	32	28	27	21	13	5	2	3	2	94132	715766	43945	553771	146	0	33	58						
40	93	78	165	152	240	381	39	19	48	38	78	36	36	39	26246101	519	31	64	46	22	35	26	1	11	19	99	5111	1230120	73	31	20	18	15	3	31	0	140						
41	155	141	62	312	1																																						

(X10^4/月)

表-1 ノード番号とゾーン領域

ノード 番号	ゾーン領域	ノード 番号	ゾーン領域	ノード 番号	ゾーン領域	ノード 番号	ゾーン領域
1	常磐道	12	神田橋(都心環状線北部)	23	芝浦	34	羽田～汐入
2	三郷～千住新橋	13	西神田～北池袋	24	芝公園	35	大黒埠頭
3	扇大橋～小菅	14	板橋本町～高島平	25	飯倉	36	生麦～東神奈川
4	四つ木～船堀橋	15	代官町	26	高樹町～渋谷	37	横浜西口～第三京浜
5	鹿浜橋～新井宿	16	外苑	27	池尻～用賀	38	横浜東口～横浜公園
6	東北道	17	霞ヶ関	28	東名道	39	山下町～横浜横須賀道
7	堤通～駒形	18	初代～高井戸	29	天現寺～目黒	40	関越道
8	入谷～本町	19	中央道	30	浦安～市川	41	新木場～葛西
9	清洲橋～箱崎	20	汐留(都心環状線東部)	31	東関道		
10	錦糸町～一之江	21	福住～枝川	32	大井～大井南		
11	京葉道	22	有明～13号地	33	勝島～平和島		

表-3 既設路線の諸条件

ルート	距離 (km)	工事前の係数				ルート	距離 (km)	工事前の係数				ルート	距離 (km)	工事前の係数			
		Q ₀	V ₁	V ₂	V ₃			Q ₀	V ₁	V ₂	V ₃			Q ₀	V ₁	V ₂	V ₃
1-2	5.1	55000	60	30	6	13-14	8.4	55000	60	30	6	24-29	4.5	55000	60	30	6
2-3	5.4	55000	60	30	6	13-15	8.3	55000	60	30	6	25-26	4.8	60000	60	30	6
3-4	2.8	100000	60	30	6	15-16	3.7	55000	60	30	6	25-29	4.2	55000	60	30	6
3-5	8.0	60000	70	35	7	15-17	2.6	70000	60	30	6	26-27	1.6	60000	60	30	6
3-7	4.0	77500	60	30	6	16-17	3.9	55000	60	30	6	27-28	6.1	60000	60	30	6
4-7	5.0	57500	60	30	6	16-18	4.3	55000	60	30	6	30-31	7.6	55000	60	30	6
4-41	12.5	60000	60	30	6	17-25	1.4	70000	60	30	6	30-41	5.3	100000	80	40	8
5-6	10.8	60000	80	40	8	17-26	4.9	60000	60	30	6	32-23	4.6	55000	60	30	6
7-9	5.3	55000	60	30	6	18-19	6.5	55000	60	30	6	32-33	5.0	55000	60	30	6
8-20	8.2	70000	55	28	6	20-23	2.7	55000	60	30	6	33-34	4.8	55000	60	30	6
9-10	4.1	55000	60	30	6	20-24	2.2	70000	60	30	6	34-35	12.2	60000	60	30	6
9-12	3.0	90000	60	30	6	21-41	4.7	55000	60	30	6	34-36	9.4	55000	60	30	6
9-20	5.3	80000	50	25	5	22-32	5.6	100000	80	40	8	35-39	5.5	75000	80	40	8
9-21	2.4	55000	60	30	6	22-41	2.6	100000	80	40	8	36-37	6.2	55000	60	30	6
10-11	7.7	55000	60	30	6	23-24	2.2	70000	60	30	6	36-38	5.3	55000	60	30	6
12-13	8.5	55000	60	30	6	23-33	7.9	55000	60	30	6	37-38	2.7	55000	60	30	6
12-15	1.7	70000	60	30	6	24-25	1.5	70000	60	30	6	38-39	4.0	60000	60	30	6
12-20	3.9	80000	50	25	5												

表-4 新設路線の諸条件

ルート	距離 (km)	工事 番号	建設 費用	工事後の係数				N	ルート	距離 (km)	工事 番号	建設 費用	工事後の係数				N
				Q ₀	V ₁	V ₂	V ₃						Q ₀	V ₁	V ₂	V ₃	
1-6	11.4	[1]	4560	55000	80	40	8	4	19-28	6.0	[9]	2400	55000	80	40	8	2
1-11	15.2	[2]	6080	55000	80	40	8	5	19-40	9.8	[10]	3920	55000	80	40	8	4
3-8	4.5	[3]	1800	55000	80	40	8	2	22-23	3.3	[11]	1320	70000	60	30	6	1
5-13	5.6	[4]	2240	55000	60	30	6	2	22-32	5.6	[12]	1600	60000	60	30	6	2
6-40	17.4	[5]	6960	55000	80	40	8	6	23-29	4.0	[13]	1600	60000	60	30	6	2
11-31	3.4	[6]	1360	55000	80	40	8	1	23-33	7.9	[14]	6720	55000	80	40	8	6
13-18	6.5	[7]	2600	55000	60	30	6	2	24-25	1.5	[15]	7760	55000	60	30	6	8
18-27	3.2	[8]	1280	60000	60	30	6	1	計								48

表-5 GAとMCによる路線開通時期の比較

番 号	N	年 度																																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38		
1	4									*											*	*	*																		
2	5								**						*											*	*									*	*				
3	2																																								
4	2											*							*																						
5	6			*	*	*	*	*	*	*																															
6	1																																			*					
7	2																																	*					*		
8	1												*																												
9	2													*	*																										
10	4	**	**																																						
11	1										*	*														*															
12	2																																								
13	2						*	*																																	
14	6																*																							*	
15	8																**				**				**																
M	C						8			10							11		3	12		5				6	1		**		13		9	2	7	4		14	15		

費用便益比

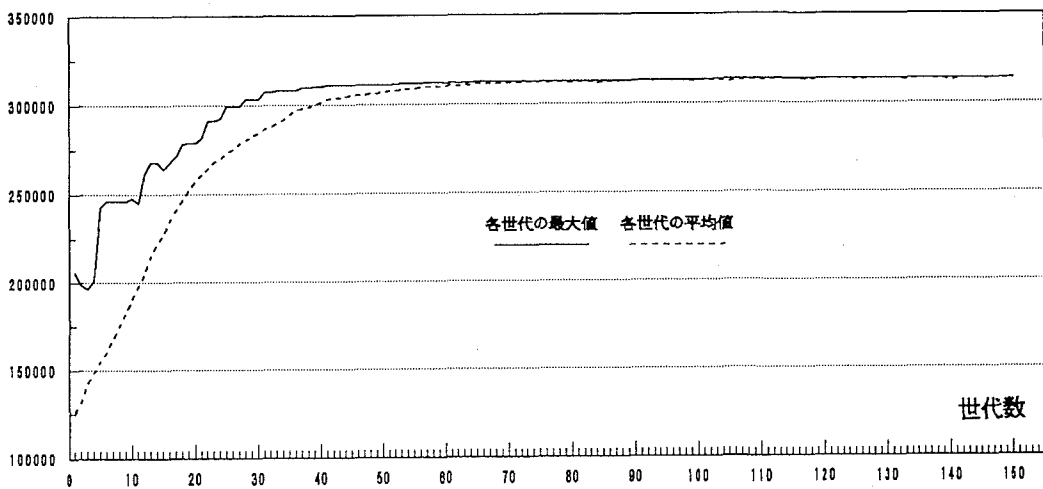


図-3 各世代の最大値、平均値と世代の関係

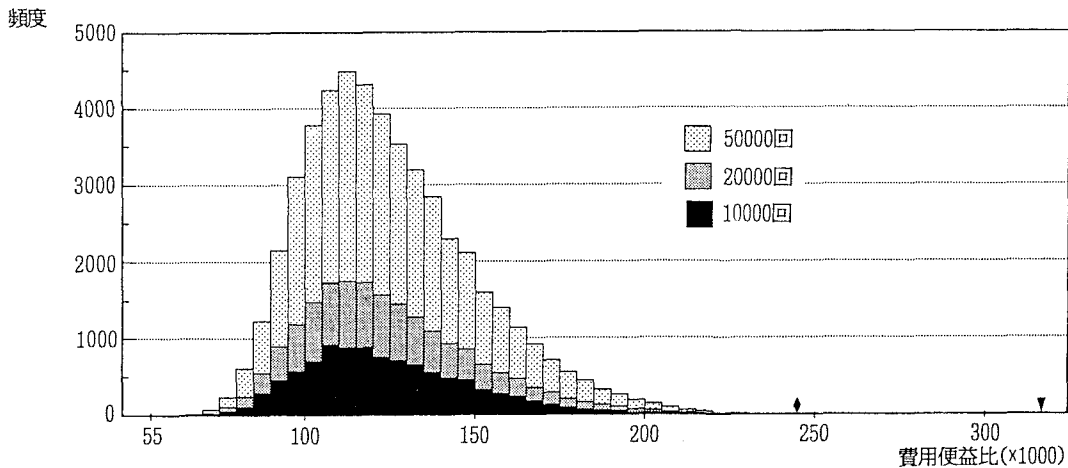


図-4 MCの頻度分布図とGAの最良値

6. 数値計算例

2. ～4. に説明した首都高速道路の新設路線の工事順位をGAを応用して求めるに際し、幾つかの種類モデルを作成した。一つは、図-1に示す15の新設路線の上下線がそれぞれ一括工事され、年間の予算が8000億単位の場合。この場合は、41ノード、133リンク、30工事区間(変数)の問題となる。もう一つは、年間予算を4000億単位、その結果建設費用が高い路線は一括工事ができないので、幾つかの路線は2分割した場合。これは、41ノード、143リンク、40工事区間(変数)の問題となる。最後に、年間予算は4000億単位であるが、各路線の工事単位の建設費がおおよそ1000億単位になるように細分し、ただし上下線同時に工事する場合。これは、41ノード、133リンク、48工事区間(変数)の問題となる。ここでは、最後の計算例のみを示す。

表-3は、既設路線の距離、図-2の各係数の値を示す。表-4は、新設15路線の距離、工事費(上下線同時着工であるので、実際は倍になる)、また各係数の値を示す。Nは、各路線中の工事単位数を表す。これらの工事単位が設計変数になるので、例えば工事番号[1]であれば、N=4であるので、その路線の4工事単位が完了して初めて、ルート1-6は開通することになる。乱数は、1種類のための結果である。

GAの計算は、人口サイズ150、最大世代数150、交叉の確率60%、突然変異の確率1%、大変異の確率50%とし、文献2)に示す、いくつかの交叉法、および突然変異法を組合わせて計算を行ったが、それらの中の最良の解を表-5に示す。また、その時の収束図を図-3に示した。GAの計算は、モンテカルロ法(MC)の結果と比較して検証している。MCでは、1万回、2万回、および5万回発生した場合の計算を行い、頻度分布図を図-4に示している。目的関数(費用便益費)は、GAの結果(▼)が313621単位であったのに対し、MCの最良の結果(◆)は243939単位であり、3割ほどGAの方が良かった。MCの計算時間はGAの10倍以上であった。表-5には、GAとMCによる各路線の開通順序を示している。GAの結果は、分割された各工事区間の竣工年度を*で示している。縦の平行線は、その路線が開通したことを表す。MCの結果は、比較的后半に工事が集中している。

図-3は、GAの収束図であり、平均値と最良値を示しているが、比較的良好な収束の様子を示していると考えられる。図-4には、MCの頻度分布の他に、GAの結果をプロットしているが、かなり良好な結果を与えているのがわかる。また、MCの結果だけ見ても、最悪の順位と最良の順位では5倍程度の目的関数の差があり、この種の問題での順位の重要さが指摘される。

7. あとがき

首都高速道路の新設路線の順位決定を、走行時間費用の改善分を分子とし総建設費を分母とする費用便益費を目的関数とする無制約の最適化スケジューリング問題として定式化し、GAを応用して解いた。数値計算の結果は、モンテカルロ法と比較したが、GAはかなり良好な解を与え、この種の問題の有効な手法となり得ると考えられる。また、順位付けの重要さが指摘された。

参考文献

- 1) 首都高速道路公団：第20回首都高速道路交通起点終点調査報告書[平日編] (調査日：平成2年10月18日(木)～19日(金)、1990。
- 2) 田村亨・杉本博之・上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用、土木学会論文集 No.482/ IV-22、pp.37-46、1994。
- 3) 杉本博之・鹿沓麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No.471/ I-24、pp.67-76、1993。
- 4) 夏秋義広・向台茂・保田敬一・古田均：連続桁床版の打設順位決定問題への遺伝的アルゴリズムの適用、構造工学論文集、Vol.41A、pp.627-633、1995。
- 5) 近田康夫・橘謙二・城戸隆良・小堀為雄：GAによる既存橋梁の補修計画支援の試み、土木学会論文集 No.513/ I-31、pp.151-159、1995。