I－18　GAによるネットワーク上の災害復旧工事の順位決定について

北海学園大学工学部　学生員　片桐章憲
北海学園大学工学部　正会員　杉本博之
室蘭工業大学工学部　正会員　田村　亨

1．概　要

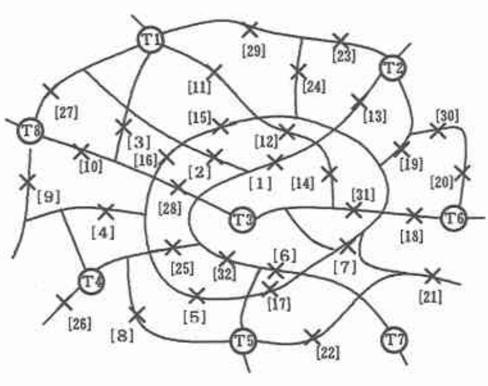
今日の我が国において、災害時におけるライフラインシステムの被害は、我々の日常生活上に多くの支障を来す問題となってきている。一般に、ライフラインと呼ばれるものには、上下水道・ガス・電気・通信・鉄道・そして道路等が挙げられ、ネットワークで結ばれている。これらのライフラインが、災害時に至る所で破損が生じた時、道路のネットワークが確保されてなければ、それぞれの復旧作業にかかれないことになる。よって、道路ネットワークの災害復旧問題[1]をここでは、取り上げることにする。

これまで、数多くの道路ネットワークにおける整備工事、災害復旧工事などのスケジューリング問題が行われてきたが、これらの問題は主に、順位決定問題[2][3]が中心に研究されている。しかし、兵庫県を中心に起こった阪神・淡路大震災(1995･1･17) でもそうであったように、災害復旧には、自衛隊や民間会社、ボランティアなどで構成された災害復旧班が活動に当たっている。この時、大規模な災害時の場合には、どこから、どの班が担当すれば効率よく、かつ経済的に本来の機能に回復するかが問題となる。この工事順位と復旧班の配分問題には、数多くのデータによる組み合わせの解析が必要となるため、この問題には、ＧＡによる解析が有効であると考えられる。

よって、これまでの順位決定問題に復旧班の配分問題[4]も加えて、道路ネットワーク上の災害復旧工事の順位決定問題に取り組むことにした。この問題における最終目的は、各班が担当する工事箇所とその順位の決定と、本文中に示す目的関数の最小化とする。ＧＡの仕組みについては文献[5][6]などに詳しい。

2．本研究の問題設定

本研究では、災害時における道路ネットワークの災害復旧工事において、各班が担当する工事順位の決定と、全ての工事箇所が復旧されるまでの工事日数を最小にすることを目的としている。この問題のための道路ネットワークモデルを想定し図－１に示す。



図－１　道路ネットワークモデル

図－１には、Ⓣ1～Ⓣ8を復旧班の拠点位置として表し、×は工事箇所として表している。よって、このモデルの問題は工事箇所数が32、復旧班数が８と設定されている。

この問題を解析するには、まず、それぞれの工事箇所には、災害による被害規模を表す被害量を与える。そして、復旧班には、１日当りに処理することのできる仕事量としての復旧能力データを与える。それらのデータの例を表－１に示す。

これらのデータをもとに、各線列は、前半に工事順位を決定する工事箇所の番号、後半に班の配分を

Application of GA to determining the priority of restoration works for damages on road network, by Akinori KATAGIRI, Hiroyuki SUGIMOTO & Tohru TAMURA

表－1　被害量と能力値の一例

工事箇所：	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]
被害量：(unit)	54	77	66	82	70	95	102	116	90	66	73	102	122	97	59	127
	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]	[28]	[29]	[30]	[31]	[32]
	130	45	60	97	73	89	91	75	49	82	66	111	71	60	99	39

復旧班：	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
能力値：(unit/日)	24	14	8	20	25	28	35	30

表す復旧班の番号として表わされる。そして、その線列が決まった数（人口サイズ）だけ作られ、それぞれの線列で目的関数の計算となる。この目的関数の計算方法は、この後に述べる。

３．計算前のマニュアル操作

図－１より、工事箇所を設計変数とし32箇所与えているのだが、工事箇所１、12、24は、最初は道路が開通していないので、復旧作業ができない箇所である。この問題では、復旧班は、現在の拠点場所から工事箇所への外側からの移動は可能として、移動可能な道路を通り工事箇所へ行き作業をする。よって、上記の３ケ所の工事箇所を最初に取りかかることは不可能である。そこで、以下のマニュアル操作が必要となる。その操作は、最初に工事可能な箇所にリンクさせるのである。その時の判断としては、まず初めに、一番近くの工事可能な箇所にリンクさせる。もしそのリンクで被害量が余りに大きくなるのであれば、次に近い箇所へと探していく。このようにしてリンクさせた結果、設計変数の数は29に変わる。これを表－２に示す。

表－２　工事箇所のリンク

リンク後の：設計変数	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
リンク前の：設計変数	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
被害量：	131	66	82	70	95	102	116	90	66	175	122	97	59	127	130	45	60	97	73	89	166	49	82	66	111	71	60	99	39

４．目的関数の定義

この問題を解く目的は前にも述べたように、全ての工事箇所が復旧されるまでの工事日数を最小にするような復旧班と工事箇所の組み合わせ、且つ工事順位の決定にある。ＧＡの初期世代に作られた線列は、その線列の中心を境に、前半が工事順位を表す工事箇所で、工事順位の順番にリンク後の設計変数の数だけ並べられ、後半が班の配分問題となる復旧班であり、設計変数に対応するようにランダムに作られる。つまり、この線列において、一番最初の工事箇所は、復旧班を表す部分の最初の復旧班が担当し、次の工事箇所は、その次の復旧班が担当するというようにして、各班に担当する工事箇所が工事順位を決定しながら配分される。この仕組みを以下に説明する。

例として、工事順位を表す前半部分と、復旧班の配分を表す後半部分に分けた、ある線列を予めリンクした後の設計変数により、次の表－３のようにように作られたとする。

表－３　線列の前半部分と後半部分の例

工事順位：	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
工事順位を：表す前半部分	13	6	27	17	16	15	29	24	4	22	1	5	9	10	18	3	19	28	12	21	11	25	23	20	14	8	7	2	26
班の配分を：表す後半部分	7	7	1	7	6	5	5	8	1	7	2	4	6	8	2	4	8	5	5	1	6	3	4	6	7	7	8	6	1

この表から、工事順位に従い左から工事箇所と復旧班を対応させることで、図－２に示すような配列が作

られる。この様な配列が作られた上で、各復旧班毎に作業日数と移動日数を計算する。作業日数の計算は、それぞれの工事箇所における被害量と担当復旧班の復旧能力から式（1）で求められる。

$$W_{ij}=\sum_{k=1}^{n} D_k / N_j \qquad (1)$$

ここに、i：線列、j：復旧班、k：各班の担当工事箇所

W_{ij}　：i 線列、j 班の作業日数（日）

D_k　：工事箇所 k の被害量（unit）

N_j　：j 班の能力力値（unit/日）

復旧班	工事箇所と順位					
1	27	4	21	26		
2	1	18				
3	25					
4	5	3	23			
5	15	29	28	12		
6	16	9	11	20	2	
7	13	6	17	22	14	8
8	24	10	19	7		

図－2　復旧班が担当する工事箇所と順位

この式により各工事箇所の作業日数が計算されるのだが、この時、今までリンクしていた工事箇所は、それぞれ独立して作業日数が計算される。そして、その総和が担当復旧班の作業日数となる。

次に移動日数であるが、これは、作業期間中、復旧班の拠点場所から工事箇所までを、毎日往復すると考えたものである。この移動日数を考慮する事は、ある復旧班が余りにも遠過ぎる工事箇所を担当するのは、緊急を要する災害復旧には、適応しにくいと考えられるからである。また、このデータが工事順位を決定するために必要だからである。この移動時間は、表－4に示すようなデータを予め与える。

表－4　移動時間の一例

復旧班	工事箇所までの移動時間（分）																															
	[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]
1	55	40	25	85	135	140	140	110	50	55	10	30	55	160	40	40	140	125	63	85	105	135	55	65	105	100	20	115	12	65	145	145
2	100	85	70	130	115	95	95	125	95	100	55	75	10	115	85	85	95	40	18	40	60	90	10	20	150	140	65	160	57	20	100	125
3	18	25	185	150	90	35	28	100	115	170	170	190	125	25	200	200	42	65	70	95	50	50	125	135	17	110	165	15	172	135	23	12
4	140	125	40	22	25	130	130	15	30	40	95	115	150	150	125	30	130	155	145	155	130	90	140	150	20	10	55	32	97	150	135	100
5	175	160	145	50	15	32	55	25	70	95	130	150	110	75	160	160	15	80	70	80	55	15	110	120	95	40	90	107	132	120	60	25
6	130	115	100	145	85	65	65	95	125	130	85	105	40	85	115	115	65	10	48	10	30	60	40	50	165	110	95	182	87	50	70	95
7	53	70	125	105	45	25	25	55	100	125	125	145	80	45	155	155	25	38	40	50	25	20	80	90	130	70	120	142	127	90	30	55
8	95	80	65	45	75	112	135	65	10	15	50	70	95	155	80	80	95	125	103	125	140	95	95	105	70	60	10	82	52	105	140	105

移動日数の計算式は、式（2）に示す。この式で各工事箇所までの移動日数が計算される。そして、これらの作業日数と移動日数を加えたものが、目的関数となり式（3）のようになる。

$$M_{ij}=\sum_{k=1}^{n}\{2\times T_{ijk}\times w_{ijk}/(60\times 24)\} \qquad (2)$$

ここに、M_{ij}　：i 線列、j 班の移動日数(日)

T_{ijk}：i 線列、j 班の工事箇所 k までの移動時間(分)

w_{ijk}：i 線列、j 班が工事箇所 k を復旧する作業日数(日)

$$O_{ij}=W_{ij}+M_{ij} \qquad (3)$$

ここに、O_{ij}　：i 線列、j 班の工事日数(日)

W_{ij}　：i 線列、j 班における作業日数(日)

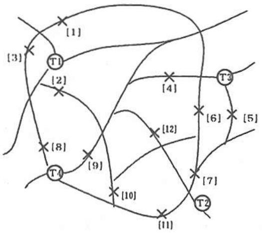
M_{ij}　：i 線列、j 班の移動日数(日)

このように各線列、各復旧班毎に目的関数を計算し、それらの目的関数値の一番大きなものが、その線列の目的関数値となる。そして、それぞれの線列で求めた中の最小値がこの問題における解となる。

5．GAの信頼性の評価

具体的な問題を解く前に、この様な工事箇所と復旧班の組み合わせから解を求める問題は、非常に多くの組み合わせが考えられるため、GAの特性が生かせると予想するが、予め解が分かっているような問題を与

えてＧＡの評価をしてみた。その際、工事箇所の数を12とし被害量は一定の 100(unit)、復旧班は４班で、能力値も一定で25(unit/日)とした。このネットワーク図と移動時間のデータを図－３と表－５に示す。



図－３　ＧＡ評価のためのネットワーク

表－５　目的関数の計算に必要なデータ

	各復旧班から工事箇所までの移動時間											
復旧班	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
1	20	15	20	80	100	90	140	110	90	100	90	90
2	140	145	140	80	80	50	10	80	75	75	10	20
3	80	85	85	20	10	20	60	130	110	120	100	110
4	110	120	110	80	100	120	110	10	15	20	55	130

ＧＡに関する主なデータとして、最大世代数は 200、人口サイズは 60、80、100、120、150、交叉確率は60%で、工事順位の部分では、一点交叉で少ない方を入れ替える。復旧班の配分部分でも同じ一点交叉だが後半部分のみを入れ替える方法（これを交叉法Ａとする。）と、50%確率で前後半を選択できる方法（これを交叉法Ｂとする。）の２種類行い、線列全体で２点交叉を行った。突然変異は確率５％で、工事順位側は２点の入れ替えを、復旧班側は２進数なので０、１の入れ替えとする。大変異確率は50%として、各世代で最良の解が、人口サイズの１割以上に達した時に行うとしている。また、収束条件は、①最大世代数に到達した時。②最良値の解が、ある世代数（判定世代数）以上更新しなくなった時（判定世代数を20～90まで10刻みで与える）③全ての線列の解が等しくなった時、として３条件を与えた。

この様な条件で計算を行うと、判定世代数が小さな時は、初期収束により最適解が求められず、判定世代数が大きな時は、場合によっては最適解が求められたが、いずれの場合も最適解は求めにくかった。その原因は、作業日数はどの班も同じで、そのオーダーに比べて移動日数のオーダーが低過ぎた事にあった。そこで、この問題に限っては、移動日数を20倍にして計算をした。また、初期収束の解消として、収束条件②で終了する時は大変異を行い、今までの結果を引継ぎ、また最初から解析を行う。これを最大世代数内で最高５回繰返す事にした（これを繰返し大変異法とする）。その結果が表－６、７で、白抜きが最適解を表す。

表－６　交叉法Ａ、移動日数20倍、繰返し大変異法を用いた計算結果

凡例

解	世代
解析数	

人口サイズ ＼ 判定世代数	20	30	40	50	60	70	80	90
60	33.75 (187/200) 11045	22.64 (98/200) 11035	22.64 (148/200) 11019	27.50 (54/200) 10817	22.64 (143/200) 11020	22.64 (121/200) 11033	22.64 (121/200) 11016	22.64 (121/200) 11016
80	22.64 (120/200) 15006	22.64 (162/200) 14985	22.64 (100/200) 15043	22.64 (100/200) 15020	22.64 (100/200) 15052	22.64 (100/200) 15024	22.64 (100/200) 15043	22.64 (100/200) 15033
100	30.28 (89/149) 14073	22.64 (147/200) 18907	22.64 (126/200) 18998	22.64 (159/200) 18977	22.64 (137/200) 18890	22.64 (137/200) 18890	22.64 (137/200) 18890	22.64 (137/200) 18890
120	22.64 (125/185) 21278	22.64 (109/200) 22928	22.64 (162/200) 22769	22.64 (145/200) 22773	22.64 (189/200) 22834	22.64 (127/200) 22832	22.64 (127/200) 22774	22.64 (127/200) 22774
150	22.64 (118/178) 25865	22.64 (164/200) 28882	22.64 (133/200) 28902	22.64 (133/200) 28970	22.64 (133/200) 28953	22.64 (133/200) 28937	22.64 (133/200) 28937	22.64 (133/200) 28937
最適解	22.64							

表－７　交叉法Ｂ、移動日数20倍、繰返し大変異法を用いた計算結果

人口サイズ ＼ 判定世代数	20	30	40	50	60	70	80	90
60	31.67 (106/166) 9203	22.64 (185/200) 11169	30.97 (149/200) 11120	22.64 (178/200) 11167	30.97 (155/200) 11066	30.97 (142/200) 11138	32.36 (54/200) 11144	32.36 (54/200) 11119
80	22.64 (88/168) 12561	22.64 (174/200) 14851	22.64 (82/200) 15052	22.64 (82/200) 15053	22.64 (82/200) 15018	22.64 (82/200) 15015	22.64 (82/200) 15038	22.64 (82/200) 14933
100	22.64 (113/193) 18383	22.64 (162/200) 18951	22.64 (124/200) 18862	22.64 (147/200) 18986	22.64 (172/200) 18729	22.64 (119/200) 18831	22.64 (119/200) 18851	22.64 (119/200) 18850
120	22.64 (163/183) 21011	30.28 (165/200) 22966	22.64 (177/200) 22978	27.50 (190/200) 23005	29.58 (179/200) 22967	30.28 (165/200) 22931	30.28 (165/200) 22931	30.28 (165/200) 22931
150	22.64 (73/173) 25024	22.64 (92/200) 28908	22.64 (92/200) 28908	22.64 (92/200) 28905	22.64 (92/200) 28895	22.64 (92/200) 28882	22.64 (92/200) 28887	22.64 (92/200) 28893
最適解	22.64							

表－８　繰返し大変異法なしの計算結果

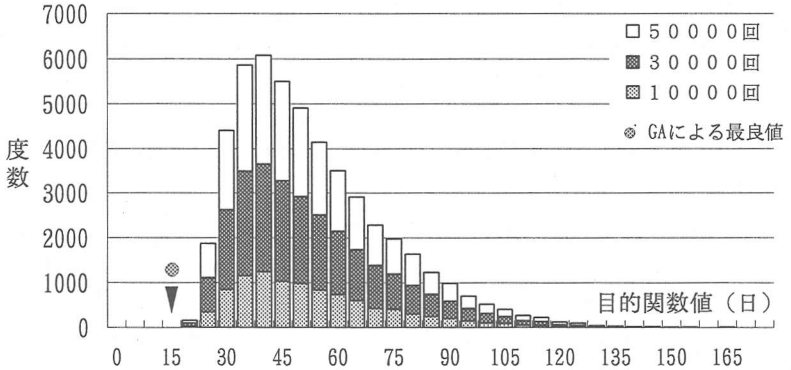
判定世代数 / 人口サイズ	20	30	40	50	60	70	80	90
60	20.44 (51/ 71) 3793	20.44 (51/ 81) 4313	20.44 (51/ 91) 4865	20.44 (51/101) 5425	20.44 (51/111) 5986	18.75 (154/200) 10958	18.75 (154/200) 10958	18.75 (154/200) 10958
80	20.38 (20/ 40) 2872	20.38 (20/ 50) 3567	20.38 (20/ 60) 4303	20.38 (20/ 70) 5044	20.38 (20/ 80) 5777	19.24 (135/200) 14827	19.24 (135/200) 14827	19.24 (135/200) 14827
100	19.67 (85/105) 9807	18.97 (109/139) 13062	18.97 (109/149) 14037	18.97 (109/159) 14982	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888
120	21.08 (15/ 35) 3928	21.08 (15/ 45) 5051	20.44 (47/ 87) 9818	20.44 (47/ 97) 10939	20.44 (47/107) 12062	20.44 (47/117) 13177	19.45 (198/200) 22542	19.45 (198/200) 22542
150	19.99 (32/ 52) 7375	19.99 (32/ 62) 8801	19.99 (32/ 72) 10222	19.99 (32/ 82) 11639	19.99 (32/ 92) 13073	19.99 (32/102) 14511	19.99 (32/112) 15940	19.99 (32/122) 17353
モンテカルロ	22.33 (10000回), 21.93 (20000回), 20.41 (30000, 40000, 50000回)							

表－９　交叉法Ａ、繰返し大変異法を用いた計算結果

判定世代数 / 人口サイズ	20	30	40	50	60	70	80	90
60	19.38 (189/200) 10875	19.58 (200/200) 10892	18.76 (160/200) 10897	18.96 (178/200) 10813	18.96 (169/200) 10943	18.75 (154/200) 10958	18.75 (154/200) 10958	18.75 (154/200) 10958
80	19.34 (181/200) 14858	18.84 (93/200) 14786	19.02 (179/200) 14612	19.57 (135/200) 14697	19.10 (166/200) 14557	19.24 (135/200) 14827	19.24 (135/200) 14827	19.24 (135/200) 14827
100	18.96 (145/200) 18909	18.97 (109/200) 18929	18.85 (199/200) 18893	18.85 (171/200) 18892	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888	18.88 (165/200) 18888
120	19.21 (150/190) 21519	19.47 (197/200) 22617	19.81 (141/200) 22636	19.01 (178/200) 22671	19.35 (189/200) 22646	19.39 (176/200) 22584	19.45 (198/200) 22542	19.45 (198/200) 22542
150	19.43 (137/177) 25314	19.21 (165/200) 28562	19.74 (190/200) 28502	19.40 (141/200) 28485	19.58 (115/200) 28582	19.56 (168/200) 28523	19.87 (153/200) 28484	19.99 (165/200) 28579
モンテカルロ	22.33 (10000回), 21.93 (20000回), 20.41 (30000, 40000, 50000回)							

表－10　交叉法Ｂ、繰返し大変異法を用いた計算結果

判定世代数 / 人口サイズ	20	30	40	50	60	70	80	90
60	18.76 (156/176) 9613	19.06 (200/200) 10982	19.00 (188/200) 11024	18.97 (193/200) 11006	18.99 (94/200) 11050	18.99 (94/200) 11097	18.98 (182/200) 11022	18.99 (178/200) 11060
80	19.53 (184/200) 14676	19.67 (170/200) 14595	19.51 (149/200) 14714	18.75 (159/200) 14715	18.75 (159/200) 14715	18.75 (159/200) 14715	18.75 (159/200) 14715	18.75 (159/200) 14715
100	20.26 (153/173) 16143	19.99 (132/200) 18544	19.25 (177/200) 18644	19.62 (200/200) 18675	19.65 (167/200) 18671	19.12 (188/200) 18633	19.27 (198/200) 18585	19.27 (198/200) 18585
120	19.99 (38/138) 15543	19.31 (184/200) 22591	18.82 (187/200) 22544	19.64 (196/200) 22558	19.39 (180/200) 22566	19.76 (115/200) 22567	19.76 (115/200) 22553	19.61 (199/200) 22554
150	19.92 (50/150) 21326	19.90 (172/200) 28486	19.41 (173/200) 28651	18.87 (184/200) 28627	18.98 (184/200) 28614	18.81 (174/200) 28674	18.99 (194/200) 28636	18.65 (168/200) 28638
モンテカルロ	22.33 (10000回), 21.93 (20000回), 20.41 (30000, 40000, 50000回)							



図－４　ＭＣ法による解の度数分布

いずれの場合も最適解が良く求められている。これより、この問題に対してＧＡが使用可能と判断した。また、交叉法Ａの方が交叉法Ｂよりも多く最適解を求めているが、交叉法Ｂは解空間を広げる意味で良いと思われるので、この後の例でも使用することにする。

６．設計変数32・復旧班数８の計算例

実際に図－１に示した設計変数32、復旧班数８の道路ネットワークを例にとって計算を行ってみた。ＧＡに必要なデータ、交叉・突然変異の方法、及び解の収束条件は前の章でＧＡの信頼性を評価する時に使用したものと同じとする。目的関数の計算に必要なデータは、表－１、表－３、表－４に参照したものとする。

この計算結果を表－８～10に示す。この問題は、リンク後の設計変数が29、復旧班数が８であるので、その組合せは、$29! \times 8^{29} = 1.368 \times 10^{57}$であるため列挙法による厳密解は望めない。よって、ＭＣ法による解と比較してみた。表の凡例は、表－６、７と同じで、編みかけ部分は、モンテカルロ法（以降はＭＣ法と略す）よりも悪かった結果である。ＭＣ法による解の分布を図－４に示す。この結果の考察は次に示す。

７．結果の考察とまとめ

今回は、計算例を１種類しか載せていないが、何種類かのケースで計算を行った結果から、解析回数を多くする事で、ＭＣ法の解よりも良好な解を求めることができた。その時、表－８の様に収束条件②の判定世代数を大きくして、解析回数を多くして解を得るよりも、表－９、又は表－10の様に収束条件②の判定世代数で終了する前に、大変異を最高５回入れて計算を繰返し、解析回数を多くして解を求めた方が、良い結果が得られた。この事から、この問題には、局所解と思われる箇所が解空間に存在しているため、初期収束すると思われる。そこで、大変異を用いて計算を繰返す事で局所解を避け、判定世代数が小さな時からＭＣ法よりも良い解が求められたと思われる。以上の事から、ＧＡの計算で解を求めるには、ある程度の解析回数は必要だと思われる。

次に、ＭＣ法の結果より、解の分布は比較的最良値側に偏る傾向が見られる。そのため、適当な組み合わせでもある程度の解は求ることが可能だと思われる。この様な傾向の中で得られたＧＡの結果から、ＧＡは大規模で、より複雑な組合わせ問題になるほど、その効果を発揮する手法だと思われる。

最後に、この問題は工事順位の決定と、復旧班の配分問題であるが、移動時間のデータを最初から固定させて与えているので、工事完了後の開通した道路を移動する時間を考慮していない。そのため、工事順位の決定に関しては、まだ不十分である。この問題の解消が、今後の課題である。

参考文献

１）川島一彦・杉田秀樹：広域震災を受けた道路ネットワークの復旧過程予測システムの開発、オペレーションズ・リサーチ２月号、pp57~61、1993.

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・田村亨・長濱裕朗：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、第４回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、1995.

４）一井康二・佐藤忠信：遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ｉ－Ｂ、pp594、1995.

５）杉本博之・鹿汴麗・山下洋敬：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、No471／Ｉ－24、pp67~76、1990.

６）北野宏明：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.