

中長期事業計画問題へのGAの応用

APPLICATION OF GA TO LONG/MIDDLE TERM PLANNING OF ROAD NETWORK PROJECT

古田均*、杉本博之**、井下泰具*、横田哲也*、廣瀬彰則**、中谷武弘**

Hitoshi FURUTA, Hiroyuki SUGIMOTO, Yasutomo INOSHITA, Tetsuya YOKOTA, Akinori HIROSE & Takehiro NAKATANI

*工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569 高槻市霊仙寺町2丁目1の1)
 **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1丁目)
 + 大阪市建設局 (〒530 大阪市北区梅田1丁目2番2-500号)
 ++ 中央復建コンサルタンツ(株) 第三設計部 (〒532 大阪市淀川区西宮原1丁目8番29号)

It is very difficult to establish an appropriate program for the long/middle term planning of public activities, because multiple projects interrelated each other should be simultaneously performed. Moreover, each project has various constraints such as financial or manufacturing and erection constraints. In this paper, an attempt is made to apply GA (Genetic Algorithm) to the long/middle term planning problems. In order to solve such problems, it is necessary to modify the GA program developed for scheduling problems by using special operations for coding, generation of initial strings, crossover and mutation. A numerical example is presented to verify the applicability of the method proposed here.

Key words: planning of road network, GA for scheduling problem, initial generation

1. まえがき

土木事業における多くの建設工事は、多数の工事要素からなるのが一般的である。それらの工事要素の総てあるいは一部の間には、何らかの順序関係があり、全体の工事計画の策定においては、その順序関係を守ることが要求される。例えば、B工事の前にはA工事が完了していなければならないとか、C工事の前には、D、E、Fの工事が完了する必要がある等々である。このような問題には、ネットワークの考え方が適用され¹⁾、PERT (programming evaluation and review technique) などが利用される。

しかし、例えば公共事業における中長期整備計画のように、一つの建設工事のみを対象にするのではなく、同時に進行する多数の工事の事業計画を、限られた予算の中で策定しなければならないことも多くある。その時、全体の工事計画の早期完了を一つの目標として考慮しながら、適正な予算の配分により最大のメリットを受益者(例えば住民)に与えるような事業計画が望ましいのは言うまでもないことである。

この問題は、個々の事業において工事要素間の順序関係を守りながら、同時に進行する多数の工事の事業計画を、与えられた制約条件のもとで、与えられた目的関数を最大(最小)にする問題として整理される。具体的には、ある地域における複数の橋梁の建設計画とか、ある道路ネットワーク上の多数の橋梁の維持・補修計画とかが対応する。

GAは組合わせ最適化問題²⁾のみならず、スケジューリング問題^{3) 4)}にも有効に応用できる手法である。

本研究で扱う問題は、特殊なスケジューリング問題となるが、初期線列の作成法、および従来のスケジューリング問題用のGAに若干の工夫を加えることにより、GAの適用が可能になる。

本研究は、同種の多くの問題の解決にも参考になると考えられ、若干の修正、拡張により幅広い適用性が期待できる。

2. 中長期事業計画問題

本研究で扱う中長期事業計画問題は、以下のように定義される。

今、 $P_1 \sim P_N$ の同時に進行する N の事業があるとす。各事業には n_j ($j=1 \sim N$) の工事要素があり、それを y_{ij} ($i=1 \sim n_j$, $j=1 \sim N$) とする。

○目的関数 : $0 \rightarrow \max$ (1)

○制約条件 :

- ・各事業における工事要素間の順序関係
- ・その他に、年度予算の制約があれば、

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i \in Y_{jk}} c_{ij} \leq B_k \quad (k=1 \sim K) \quad (2)$$

また、年度をまたがる工事がなければ、

$$\sum_{i \in Y_{jk}} t_{ij} \leq 12 \quad (j=1 \sim N, k=1 \sim K) \quad (3)$$

などが設定される。

表-1 先行工事例

工事	5	6	7	8	9
先行工事	1	3	4 6	2 5 6	7 8

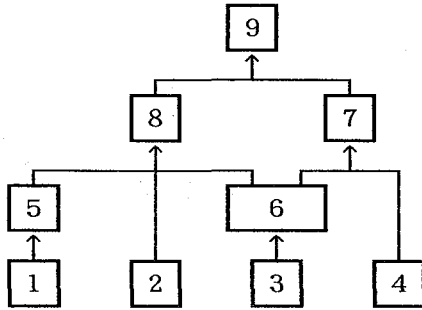


図-1 アロー・ダイアグラム

○設計変数 : Y_{jk} ($j=1\sim N, k=1\sim K$) (4)

ここで、0は対象事業が完成する過程で評価される目的関数で、例えば、総ての事業ができるだけ早く完了するとか、あるいは個々の事業の完成に伴う住民への定量化されたサービスの積算量とかが考えられる。制約条件で設定される工事要素間の順序関係とは、例えば、表-1のような順序関係が要求されれば、図-1のようなアロー・ダイアグラムとして表現されるものである。これらがNの事業総てにおいて個々に設定されることになる。 c_{ij} と t_{ij} は、それぞれj事業のi工事要素に必要な工事費と工期(月)、 B_k はk年度の総予算である。 Y_{jk} は、j事業に含まれる工事要素のうち、k年度に実施される工事要素の集合である。Kは想定している事業完了の最終年度である。式(3)の12は、年度内の工事が12ヶ月以内で完了することを意味する。

以上が、本研究の「中長期事業計画問題」となる。

3. 同時複数事業計画問題のためのGA

工事要素間に守らなければならない順序関係を持つ複数の事業の計画問題であるので、GAの応用は一見難しそうであるが、後記の一点交叉法の特質を利用すると応用が可能になる。

以下に、コーディングとデコーディング、初期線列の作成、および交叉法と突然変異について説明する。

3-1 コーディングとデコーディング

本研究で扱っている問題は、総計

$$NDV = \sum_{j=1}^N n_j \quad (5)$$

の工事要素の実施順位決定問題になるが、まず総ての工事要素に、事業順かつ工事番号順に通し番号をつける。そのNDVの数字の並びがここでの線列になる。例えば、

$N=2, n_1=n_2=4$ という簡単な例では、

$[7 \ 4 \ 3 \ 6 \ 8 \ 5 \ 2 \ 1]$

のような形になる。これを、各事業の工事に直すと、

$[Y_{32} \ Y_{41} \ Y_{31} \ Y_{22} \ Y_{42} \ Y_{12} \ Y_{21} \ Y_{11}]$

と表される。これは、この順に工事をするを意味するが、式(2)および(3)の条件がある場合は、左から順に工費及び各事業毎の工期を積算し、どちらかが式(2)あるいは(3)を満足しなくなった場合に、そこまでの工事要素をその年度の事業工事とする。

上の例で、3年度の予定の工事が、以下のように年度に分けられた場合、

$[Y_{32} \ Y_{41} \mid Y_{31} \ Y_{22} \ Y_{42} \ Y_{12} \mid Y_{21} \ Y_{11}]$

各事業の年度毎の事業計画は表-2のようになる。

表-2 年度計画

年 度	1	2	3
事業-1 (Y_{1k})	Y_{41}	Y_{31}	$Y_{21} \ Y_{11}$
事業-2 (Y_{2k})	Y_{32}	$Y_{22} \ Y_{42} \ Y_{12}$	

この場合、事業1は3年度に、事業2は2年度に完了することになる。

3-2 初期線列の作成

後記のように、本研究の問題において、工事要素間の順序関係があるにもかかわらず一般のスケジューリング問題のためのGAが適用できるのは、後記の一点交叉法を用いれば、総ての線列に設定された順序関係を世代の最後まで残すことができることによる。

そのために、初期線列の状態が重要になってくる。各事業において、工事要素間の順序関係があれば、総ての初期線列において、その順序関係は守られる必要があるからである。

複数の事業があり、それぞれにおいて順序関係がある場合、通常のGAで行われるようにまったくランダムに初期線列を発生することはかなり難しい。そこで、本研究では以下のような手順により初期線列を作成した。

①各事業毎に、順序関係を守る複数の「工事順位」を任意に作成する。前出の図-1のケースであれば、

$1 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$

$4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 9$

$2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$

等である。この時、順序関係は必ず守らなければならないが、一方で順序関係以外の関係(1-4あるいは5-6等)は、できるだけ色々な組合せがあった方がよい。上の例では1-4、4-1、あるいは5-6、6-5が含まれる等である。

この段階は、自動化してまったくランダムにすることは可能であるが、不自然な順序(例えば、橋脚施工に先行して、桁の架設工事が開始される等)を排除する意味で、経験ある技術者の知識を利用することが得

策であろう。「工事順位」の数は事業内容で異なるので、事業間で同じである必要はない。

②①で作成された各事業毎の複数の「工事順位」からそれぞれ任意に一つの「工事順位」選ぶ。N個の「工事順位」が選ばれることになる。

③1～NDVの番号の中から、各事業毎に任意に n_i 個の番号を抽出する。次に、線列の該当する番号に「工事順位」の左の工事要素から順に入れる。同じ番号は2度選ばれない。この作業を $j=1\sim N$ まで繰り返す。

④②と③の作業を、作成された線列の数が指定された人口サイズになるまで繰り返す。

以上の手順により、各事業毎に設定された順序関係を守りながらランダムな線列が作成されることになる。

3-3 交叉と突然変異

GAには3つの基本的なオペレータがある。「繁殖・淘汰」、「交叉」および「突然変異」である。本研究の問題は、順序関係という特殊な条件が入るため、これらのオペレータの使い方に工夫が必要である。

まず、「繁殖・淘汰」であるが、これは通常のGAと同じ使い方ができる。

「交叉法」は、スケジューリング問題のためにいくつかの方法が提案されている。本研究では、交叉により線列内部に組み込まれた順序関係が崩されては困るので、下記の方法を用いることにする。例により具体的に説明する。この例では、親Aと親Bでは1-6、4-6の順序関係のみ共通している。

①切断箇所を確率的に決める。

親A: 2 8 5 4 1 | 6 3 7

親B: 7 3 1 4 6 | 5 8 2

②子は、親の切断箇所の左右の数の多い方をまずそのまま受け継ぐ。

子a: 2 8 5 4 1 | □ □ □

子b: 7 3 1 4 6 | □ □ □

③親の左を受け継いだら左から、右を受け継いだら右から、他方の親の線列を見て行き、自分にない数字を入れる。

子a: 2 8 5 4 1 | 7 3 6

子b: 7 3 1 4 6 | 2 8 5

このようにして新しい線列が生まれることになる。親A、Bに共通に設定された1-6、4-6の順序関係は交叉の後でも子a、bに引き継がれている。

この例で示されるように、この交叉法の特徴は、「ある順序関係が初期に総ての線列に組み込まれていれば、その順序関係は上記の交叉法を繰り返しても崩れることはなく、逆に総ての線列に組み込まれていなければその順序関係は崩される。」ということにある。

突然変異は、一般に順序関係を崩す形で用いられる。本研究の問題では、どのような場合でも順序関係が崩されることは好ましくないため、突然変異は用いないことにする。その代わりに、交叉確率を通常値(60%程度)

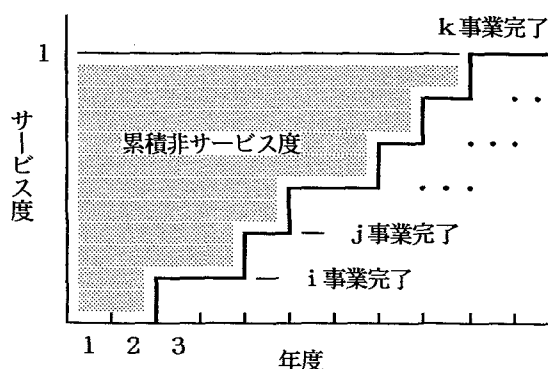


図-2 目的関数

よりも高い値に設定して突然変異の役目の一部を負わせることにする。

以上の考え方により、本研究のGAの計算は、標準的なスケジューリング問題のための汎用プログラム⁵⁾のパラメータの設定のみで対応できることになる。

4. 数値計算例

本研究の手法の応用例として、7事業、総工事要素数86の年度計画の作成を試みる。各事業、各工事要素の工事費(unit)、工期(月)および先行工事を表-3に示した。また、先行工事の関係から作成されるアロー・ダイアグラムを各事業毎に図-3～図-9に示した。

この問題の目的関数の考え方を図-2に示している。事業jは、完了すると住民に対して w_j のサービスの提供があるとし、事業が進むに従いサービス度は年度毎に累積されるとする。各事業のサービス度の和を1とする

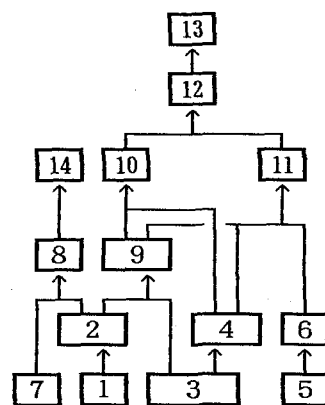


図-3 事業1のアロー・ダイアグラム

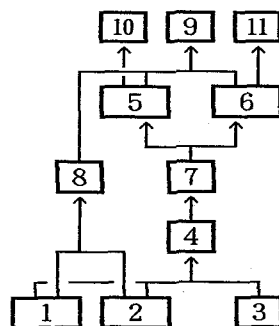


図-4 事業2のアロー・ダイアグラム

表-3 7事業の工事費、工期及び先行工事データ

事業	工事	工事費 (unit)	工期 (月)	先行工事	事業	工事	工事費 (unit)	工期 (月)	先行工事	事業	工事	工事費 (unit)	工期 (月)	先行工事
1	1	40	3		3	5	650	9		5	7	40	3	2
	2	160	9	1		6	700	9			8	15	1	7
	3	100	6			7	500	6	1, 2, 4		9	20	3	4
	4	50	9	3		8	500	9	2, 3, 5, 6		10	10	1	9
	5	100	6			9	150	3	7, 8		1	250	9	
	6	50	9	5		10	350	6	1, 3		2	70	6	1
	7	230	9			1	500	12			3	250	9	
	8	180	9	2, 7		2	400	9			4	70	6	3
	9	270	9	1, 2, 3		3	150	6	2		5	20	3	
	10	200	6	4, 9		4	400	9			6	20	6	5
	11	200	6	4, 6, 9	4	5	150	6	11	6	7	200	9	1, 3
	12	150	6	10, 11		6	1110	9			8	100	6	2, 4, 7
	13	40	3	12		7	340	9			9	35	3	4, 6
	14	150	3	8		8	230	6	6, 7		10	20	3	2
2	1	230	6			9	375	6	1, 2		11	10	1	10
	2	230	6			10	375	6	4, 2		12	15	3	6
	3	160	6			11	375	6	4, 2		13	5	1	12
	4	110	6	1, 2, 3		12	375	6	4, 2		1	600	6	
	5	230	3	7		13	330	6	3, 9		2	600	6	
	6	230	3	7		14	340	6	3, 5, 10		3	200	6	
	7	130	6	4		15	330	6	5, 6, 12		4	150	6	1, 2, 3
	8	200	9	1, 2		16	90	3	8, 13, 14, 15		5	500	6	7
	9	140	3	5, 6, 8		17	200	3	6		6	500	6	7
	10	100	3	5	5	1	55	6		7	7	580	6	4
	11	20	1	6		2	50	6	1		8	600	9	1, 2
3	1	2250	12			3	50	6			9	370	6	5, 6, 8
	2	750	12			4	50	6	3		10	250	3	5
	3	1000	12			5	415	9	1, 3		11	30	3	6
	4	650	9			6	200	6	2, 4, 5					

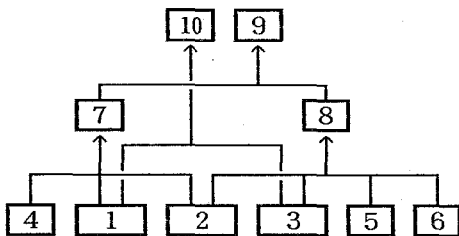


図-5 事業3のアーロ・ダイアグラム

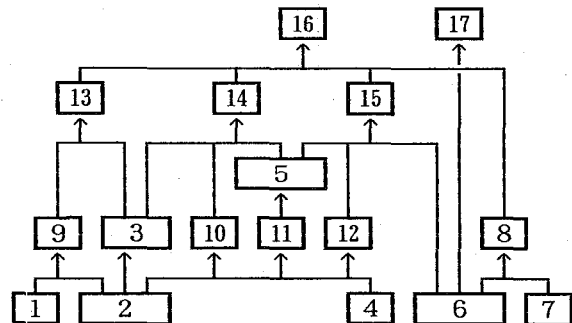


図-6 事業4のアーロ・ダイアグラム

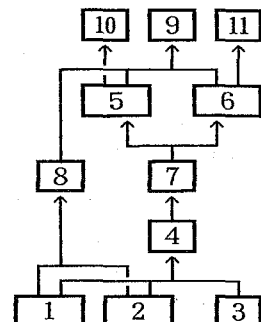
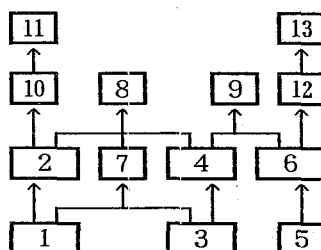
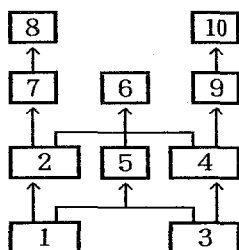


図-7 事業5のアーロ・ダイアグラム 図-8 事業6のアーロ・ダイアグラム 図-9 事業7のアーロ・ダイアグラム

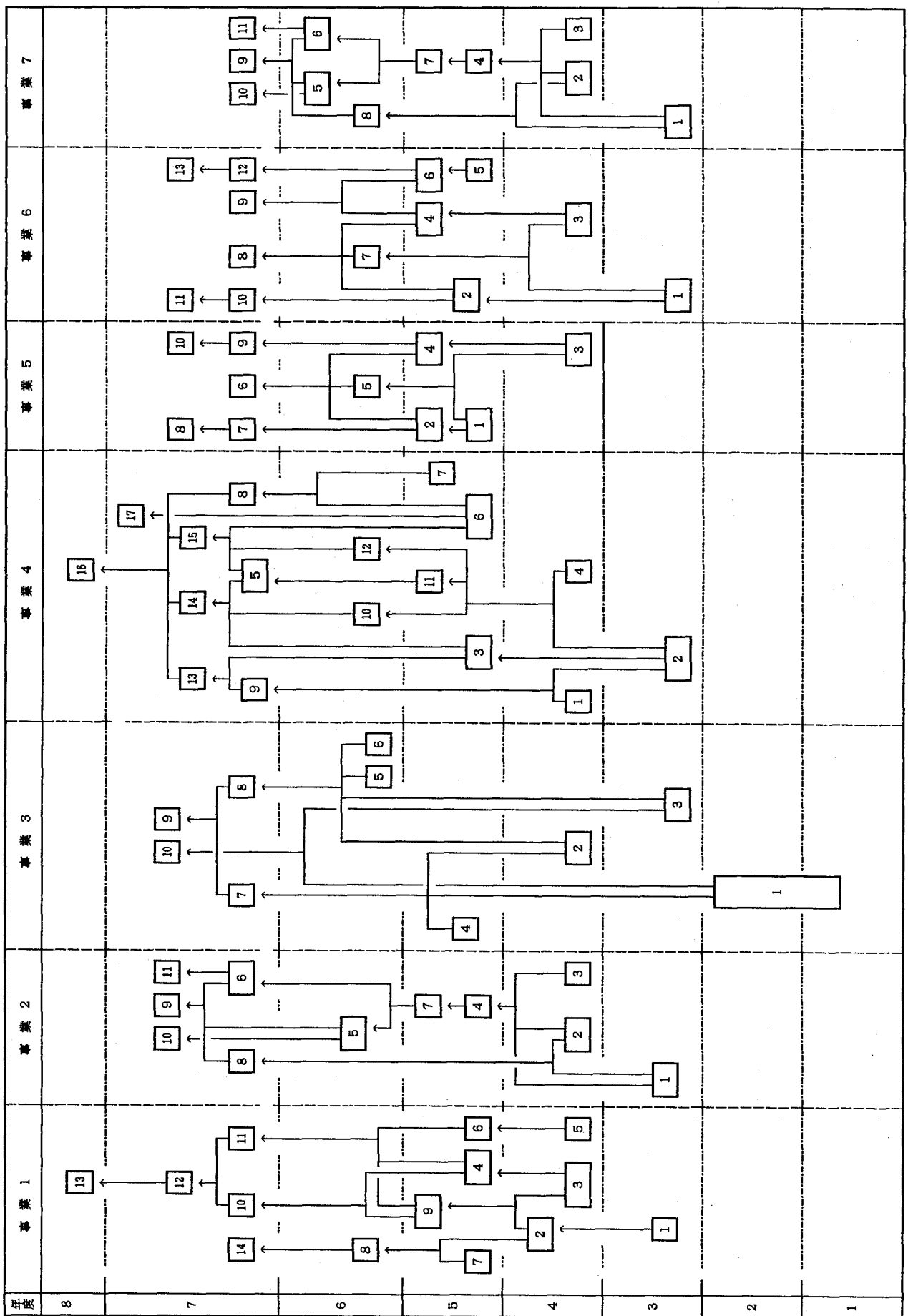


図-10 各工事の実施年度と7事業全体のアロー・ダイアグラム

表－4 デコーディングされた計算結果と工費、工期の集計

年度	1	2	3	4	5	6	7	8
事業 番号	1		1	2+3+5	4+6+7+9	8	10+11+12+14	13
	2		1	2+3	4+7	5	6+8+9+10+11	
	3	1	1+1	3	2	4	5+6	7+8+9+10
	4		2	1+4	3+6+7+11	10+12	5+8+9+13+14+15+17	16
	5			3	1+2+4	5	6+7+8+9+10	
	6		1	3	2+4+5+6	7	8+9+10+11+12+13	
	7		1	2+3	4+7	5+6+8	9+10+11	
総工費	750	1500	2520	3500	4530	4725	5965	130
年度予算	500	1500	2500	3500	4500	4500	6000	6000
最大工期	4	8	12	12	12	9	12	3

と、1からサービス度を引いた累積非サービス度（図の網掛した部分の面積）最小を目的関数とする。住民サービスに対する事業相互の相関関係を考慮することも可能であるが、ここではそれが目的ではないので、簡単な定式化に留めた。この問題では、各事業のサービス度は、事業1から順に、22、23、25、11.5、22、6、および26とした。この総計は、135.5となる。各事業のサービス度は、この総計で除されて正規化される。

目的関数にはこの他、各事業毎に、まったく工事が入らない年度がある場合、開いた年度の長さに応じて、また年間の総工事費が年度予算を越えた場合にのみ、越えた量に対応するペナルティ項を加えている。

制約条件は、すでに示した工事要素間の順序関係と、年間の総工事費が年度予算以下であること、および年間の工事に要する最大工期が12ヶ月を上回らないこととしている。これらの条件により線列の工事要素の並びは、各年度に配分されるわけであるが、工期による年度配分は、累積された工期が12ヶ月を越えたら一つ前の工事要素までを当該年度の工事とするが、予算に関しては、累積された総工事費が年度予算を超えたらそこまでの工事を当該年度の工事としている。これは、予算に関しては多少弾力的な運用が行われる可能性が高いことによる。そのため、年度毎の総工事費は、年度予算を多少上回る結果が得られることになる。

年度予算（unit）は、1年度から順に、500、1500、2500、3500、4500、4500、6000 unit、8年度以降は6000unitと設定している。

計算結果を表－4に、各工事の実施年度と7事業全体のアロー・ダイアグラムを図－10に示した。総工費は年度予算より等しいか大きめに出るように年度配分がされるが、ペナルティ項の効果により大きく越えることはなかった。当然であるが工期の条件は守られている。

各事業の年度内の工事は、該当年度内にそれらの工事が行われることを意味し、表記の順にされる訳ではない。

なお、事業3の工事要素1は、表－3に示すように他

の工事に比べて工事費が大きいので、1工事要素 750unitの工事要素に3分割している。

結果は、6年度以前に完了する工事がなく、累積非サービス度最小を目的関数とする問題の設定と矛盾するように見えるが、ある特定の事業を早く行くと、予算の配分で無理が生じ、他の事業の完了年度が遅くなることになり、結局目的関数が小さくなるためである。

比較的合理的な年度計画が得られたと考えられる。

5. あとがき

街路整備事業、橋梁整備事業、あるいは多数の橋梁の維持・補修計画などの中長期にまたがる公共事業の事業計画にGAを応用することを試みた。

初期線列作成段階で、実務者の知識、経験を簡単な手続きで取り込みながら、必要な条件を組み込むことにより、標準的なスケジューリング問題のためのGAの利用が可能であることを示し、7事業からなる比較的複雑な計算例でその効果を示した。

末筆ではあるが、本研究の遂行に当たり、岐阜大学秋山孝正先生、関西大学広兼道幸先生の貴重な助言があったことを付記し謝意を表する

参考文献

- 1) 樗木・渡辺：土木計画数学2、森北出版、1990.
- 2) 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、1997.
- 3) 田村・杉本・上前：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への応用、土木学会論文集、No.482/I-22、pp.37-46、1994.
- 4) 杉本・片桐・田村・鹿：GAによるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A、pp.517-524、1997.
- 5) 鹿：遺伝的アルゴリズムの工業設計への応用に関する研究、平成8年度室蘭工業大学博士論文、1997.

（1997年9月26日受付）