

Memetic アルゴリズムによる中長期事業計画策定

Optimal long/middle term planning of public activities using Memetic Algorithm

中津功一郎*, 古田均**, 服部洋*, 石橋健***, 小椋翔太****

Koichiro Nakatsu, Hitoshi Furuta, Hiroshi Hattori, Ken Ishibashi, Shota Ogura

*情博, 関西大学ポスドクトリアルフェロー, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

**工博, 関西大学教授, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

***関西大学大学院博士課程前期課程, 総合情報学研究科知識情報学専攻 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

****トランスコスモス株式会社 (〒150-8530 東京都渋谷区渋谷 3-25-18)

The purpose of this research is to establish an appropriate program for the long/middle term planning of public activities. This planning should account for various constraints. The previous research attempted to obtain an appropriate solution by applying Genetic Algorithm (GA). However, in the method, the solution obtained may not be optimal due to the lack of diversity among individuals. In this study, an attempt is made to develop a decision support system of the optimal long/middle term planning by using Memetic Algorithm (MA). MA can obtain the solutions which satisfy all constraints by adopting the repair of gene. Numerical examples are presented to demonstrate the applicability of the proposed method through the comparison with GA computation.

Key Words: Planning of road network, Scheduling problem, Genetic algorithm, Memetic algorithm

キーワード: 事業計画策定, 計画問題, 遺伝的アルゴリズム, Memetic アルゴリズム

1. はじめに

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すべて、あるいは一部の間には、何らかの順序関係があり、全体の工事計画策定においては、その順序関係を守ることが要求される。

また、例えば公共事業における中長期整備計画のように、一つの工事のみを対象とするのではなく、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。そのとき、全体の工事計画の早期完了を一つの目的として考慮しながら、適正な予算配分により最大のメリットを受益者に与えるような事業計画が望ましいのはいままでのことである。

本研究では、中長期にまたがる公共事業として、街路整備事業、橋梁整備事業、あるいは多数の橋梁の維持・補修計画などを想定し、それらの効率的な計画の策定を

考える。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下で、与えられた目的関数を最適化する特殊なスケジューリング問題として定義される。古田ら¹⁾は、この問題に対して、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を応用し、多制約条件下における最適化問題において広く用いられている方法である遺伝子のコーディングや初期個体の生成方法などに工夫を加えることで、制約を満たした解の探索を試みている。

しかし、古田らの研究で用いている制約充足方法では、交叉・突然変異による制約違反した個体の生成を抑制することで制約を満たした解を探索するため、中長期事業計画問題のような制約条件間に相互関係が存在する複雑な問題空間では、個体群の多様性が欠如し、大域探索を行うことが困難であると考えられる。このような解探索では、探索が初期収束に陥り、得られた解が局所解で

ある可能性がある．特に，実問題規模の問題では，問題空間や制約がさらに複雑化することが想定されるため，実用的であるとは言い難い．

Memetic アルゴリズム (MA: Memetic Algorithm) は，GA に代表される進化型最適化手法による大域探索と問題領域の知識を利用した局所探索のハイブリッド手法である^{2), 3)}．局所探索により得られた情報の用い方として，ラマルク進化やボールドウィン効果に基づく方法が提案されており，問題に応じて適切な設計を行うことで，より柔軟な解探索を行うことができる．多制約条件下のような複雑な問題空間において，ボールドウィン効果に基づく局所探索を用いた MA が有用であると考えられている^{2), 4)}．そこで，本研究では，上述のような制約充足法とは異なり，ボールドウィン効果に基づく遺伝子修復を用いた局所探索により，制約を満たした解の探索を行う．この方法では，制約を違反した解は制約を充足するよう局所探索することから，制約違反した解の生成を抑制する必要がなく，さらに，制約違反した解の情報を用いて最適解の探索を行うことが可能であり，ペナルティ関数法などの方法と比較して，有効な解を探索できることが，ナップサック問題のようなベンチマーク問題において実証されている⁵⁾⁻⁸⁾．

本研究では，数値計算例として，小規模，中規模，および大規模の中長期事業計画問題において，GA を用いた従来手法と MA を用いた本手法を適用し，比較検討を行うことにより，本手法の有用性の検証を行う．

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の定義として，古田らの研究¹⁾により提案された定義を用いる．

今， $P_1 \sim P_N$ の同時に進行する N の事業があるとする．各事業には n_j ($j = 1 \sim N$) の工事要素があり，それらを y_{ij} ($i = 1 \sim n_j, j = 1 \sim N$) とするとき，目的関数と制約条件，設計変数は次のように表される．

目的関数： $O \rightarrow \max$ (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．

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

ここで， O は対象事業が完成する過程で評価される目的関数を表し，例えば，全ての事業の早期完了や個々の事業の完成に伴う住民へ提供されるサービスの総和などが考えられる．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るなら，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 の事業すべ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．

本研究では，以上の定義に基づき，中長期事業計画策定を試みる．

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

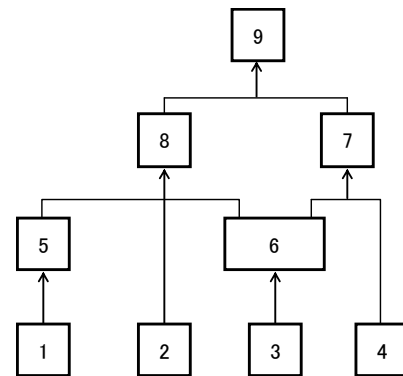


図-1 アローダイアグラム

3. 遺伝的アルゴリズムによる中長期事業計画策定

3.1 コーディング

コーディング方法として，古田ら¹⁾と同様の方法を用いる．本研究で扱う問題は，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となるが，まず全ての工事要素に，事業順かつ工事番号に通し番号を付ける．その NDV の数字の並びがここでの遺伝子列になる．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]

のような形となる．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ことを意味するが、式 (2)、および式 (3) の条件がある場合、左から順に工費、および各事業の工期を積算し、どちらかが式 (2) あるいは式 (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、以下のような年度に分けられた場合、

$[y_{32} \ y_{41} | y_{31} \ y_{22} \ y_{42} \ y_{12} | y_{21} \ y_{11}]$
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となる。

3.2 同時複数事業計画策定の考慮

この問題は、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ことから、制約を満たした解を探索するだけでなく、その順序関係を崩すことなく探索する必要がある。このような複数の制約条件があり、かつ制約条件間に相互関係がある複雑な問題において、制約を満たした有用な解を探索する方法として、ペナルティ関数法や特殊なコーディングが広く用いられている。古田らの研究⁹⁾においても、これらの方法を用いて同時複数事業計画策定を考慮している。

古田らの研究では、次に示す制約に対して、制約充足を試みる。

- ・工事要素間の順序関係
- ・年間の総工事費と年度予算
- ・工期による年度配分

まず初期個体の遺伝子列生成において、通常の GA で行われるように全くランダムに遺伝子列を生成するのではなく、工事要素間の順序関係を違反しない遺伝子列の生成を行う。

次に、交叉として、図-2 に示す交叉を用いる。この交叉では、確率的に交叉位置を決定し、交叉位置の左右で数の多い方はそのまま子に受け継がれ、少ない方は交叉相手の順序へ並べ替える。図-2 の例では、STEP1 で交叉位置を決定し、色の塗られていない箇所は、STEP3 に示すようにそのまま子へと受け継がれる。色の塗られている箇所は、STEP2 のように、交叉相手の遺伝子列の順序に従うことで、STEP3 に示す新たな個体が生成される。初期個体の遺伝子列を、上述の方法で生成することから、この交叉により順序関係を崩すことなく、新たな個体を生成することができる。

最後に、突然変異は、順序関係を崩す可能性が高いことから、制約を満たした解の探索の妨げとなるため用い

ていない。その代わりに、交叉率を通常の値 (60%程度) よりも高い値に設定し、突然変異を用いないことによる探索効率の低下を抑えている。

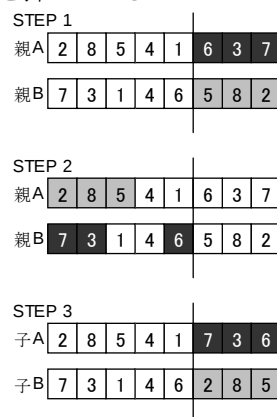


図-2 交叉

また、年度毎の工事配分では、年間の総工事費が年度予算以下であること、および工期による年度配分では、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遺伝子列の工事要素の並びは、累積された工期が 12 ヶ月を超えたら一つ前の工事要素までを当該年度の工事とし、予算に関しては、その年度の総工事費が年度予算を超えた時点で、その工事の一つ手前までを年度内の工事とする。

3.3 数値計算例

古田らの提案した解法を年度計画問題へ適用し、その解探索性能について検証する。まず、数値計算例として用いる各事業、各工事要素の工事費 (unit)、工期 (月)、および先行工事を表-3 に示す。

本研究では、数値計算例として小規模、中規模、および大規模の年度計画問題への適用を試みる。各問題で用いるデータは、表-3 に示す事業を用いることとする。小規模の年度計画問題は、事業 2 と 4, 6, 7 の 4 事業、総工事要素数 52 とし、中規模は事業 1 から 7 の 7 事業、総工事要素数 86、そして、大規模は 14 事業全て、総工事要素数 174 の年度計画問題とする。なお、中規模の年度計画問題は、古田らの研究において用いられたものである⁹⁾。

この問題で用いる目的関数を図-3 に示す。事業 j は、完了すると住民に対して w_j のサービス提供があるとし、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 とすると、1 からサービス度を引いた累積非サービス度 (図-3 の色が塗られた部分の面積) の最小化を目的関数とする。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, 26, 20, 21, 13, 23, 24, 15 および 21 とする。各事業のサービス度は、総計で除されて正規化される。

表－3 各事業の工事費，工期および先行工事データ

事業	工事	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	工事費 (unit)	40	160	100	50	100	50	230	180	270	200	200	150	40	150			
	工期 (月)	3	9	6	9	6	9	9	9	9	6	6	6	3	3			
	先行 工事		1		3		5		2, 7	1, 2, 3	4, 9	4, 6, 9	10, 11	12	8			
2	工事費 (unit)	230	230	160	110	230	230	130	200	140	100	20						
	工期 (月)	6	6	6	6	3	3	6	9	3	3	1						
	先行 工事				1, 2, 3	7	7	4	1, 2	5, 6, 8	5	6						
3	工事費 (unit)	2250	750	1000	650	650	700	500	500	150	350							
	工期 (月)	12	12	12	9	9	9	6	9	3	6							
	先行 工事							1, 2, 4	2, 3, 5, 6	7, 8	1, 3							
4	工事費 (unit)	500	400	150	400	150	1100	340	230	375	375	375	375	330	340	330	90	200
	工期 (月)	12	9	6	9	6	9	9	6	6	6	6	6	6	6	6	3	3
	先行 工事			2		11			6, 7	1, 2	2, 4	2, 4	2, 4	3, 9	3, 5, 10	5, 6, 12	8, 13, 14, 15	6
5	工事費 (unit)	55	50	50	50	415	200	40	15	20	10							
	工期 (月)	6	6	6	6	9	6	6	1	3	1							
	先行 工事		1		3	1, 3	2, 4, 5	2	7	4	9							
6	工事費 (unit)	250	70	250	70	20	20	200	100	35	20	10	15	5				
	工期 (月)	9	6	9	6	3	6	9	6	3	3	1	3	1				
	先行 工事		1		3		5	1, 3	2, 4, 7	4, 6	2	10	6	12				
7	工事費 (unit)	600	600	200	150	500	500	580	600	370	250	30						
	工期 (月)	6	6	6	6	6	6	6	9	6	3	3						
	先行 工事				1, 2, 3	7	7	4	1, 2	5, 6, 8	5	6						
8	工事費 (unit)	170	260	430	230	370	220	440	360	390	920	430	180					
	工期 (月)	3	3	6	3	9	3	6	6	6	9	6	3					
	先行 工事		1		3	2, 4			7	5, 6, 8	8	5	9, 11					
9	工事費 (unit)	330	270	430	290	430	300	610	370	570	150	160	520	970				
	工期 (月)	6	3	6	6	6	6	6	6	6	3	3	6	9				
	先行 工事			1, 2		1	5		4, 7	8	3, 6	9	9	11, 12				
10	工事費 (unit)	10	200	10	160	110	30	20	40	40	40	330						
	工期 (月)	1	6	3	6	9	6	3	6	3	3	9						
	先行 工事					1, 2, 3		4, 6	5	7	7	8, 9, 10						
11	工事費 (unit)	1380	670	1150	530	1210	560	1150	160	1030	300	950	900					
	工期 (月)	12	6	9	6	9	6	9	3	9	3	12	6					
	先行 工事			1		1		1	6	3, 5	7	2, 4	8, 9, 10, 11					
12	工事費 (unit)	330	890	410	600	100	970	630	1030	2090	850	340	970	530	950	370	390	
	工期 (月)	9	9	9	6	3	6	6	12	12	9	3	9	6	6	3	3	
	先行 工事					2	1, 3		4, 6	5, 7	8, 9	8, 9	8, 9	12	10, 11	12	14	
13	工事費 (unit)	230	20	30	10	210	30	10	40	30	20	20	40	10	40	40		
	工期 (月)	6	3	3	3	6	3	3	3	3	3	6	3	1	3	6		
	先行 工事		1	1	2, 3		5	6	6	2	4	4, 8	10	9	11	12, 13, 14		
14	工事費 (unit)	410	590	810	380	350	160	380	150	360								
	工期 (月)	9	9	12	6	6	3	6	3	9								
	先行 工事				3	3	1, 2	4, 5, 6	4, 5, 6	7, 8								

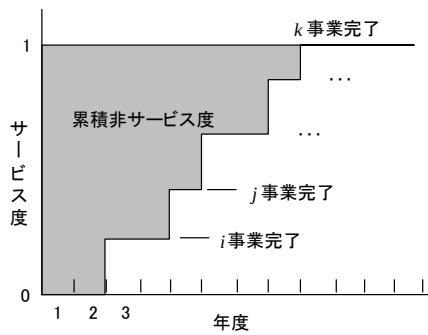


図-3 目的関数

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。

年度予算 (unit) は、小規模の年度計画問題では、初年度から順に 300, 900, 1500, 2000, 2700, 2700, 3500unit とし、8 年度以降は 3500unit と設定し、中規模では、500, 1500, 2500, 3500, 4500, 4500, 6000unit とし、8 年度以降は 6000unit、大規模は、1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 9000, 12000unit とし、8 年度以降は 12000unit と設定している。

3.4 従来手法の問題点

3.3 で述べた 3 つの規模の問題に対して適用した GA のパラメータを表-4 へ、それぞれ 20 回ずつ試行して得られた結果として、問題の規模毎に最良解の評価値についての最良値と最悪値、平均値を表-5 に示す。また、中規模の問題において、最良の結果が得られたときの解探索の推移を図-4 に示す。

古田らの提案する解法⁹⁾では、初期世代の生成などに工夫を加えることで制約を満たした解を探索できる。また、古田らの研究により、中規模の問題において得られた解の有用性の検証も行われている。しかしながら、図-4 に示すように、解探索が早期に収束していることがわかる。中規模以外での解探索の推移も同様であり、問題規模が大きくなることで、個体群の多様性が欠如し、解探索が局所解に陥る可能性が高くなることが予想される。

工事要素間の順序関係を守るために、古田らは初期個体の遺伝子生成と交叉方法、突然変異を用いないというように複数の工夫を加えている。これらの制約充足手法は、制約違反した個体の生成を抑制することから、多少ではあるが問題空間上の探索範囲を狭めてしまう。それぞれの手法により狭められる探索範囲は、個体群の多様性維持に対して大きな影響を持たないが、複数の手法を併用することで、局所探索と大域探索をバランス良く行うことが困難となる可能性がある。

以上のような問題点が考えられることから、中長期事業計画問題のような実問題規模の問題では、解空間が非

常に大きいことが予想され、従来手法による制約充足法では、実用的ではないと考えられる。

表-4 GA のパラメータ

個体数	2000
交叉率	0.8
突然変異率	0.00
最大世代数	500

表-5 適用結果

規模	小規模	中規模	大規模
最悪評価値	4.744	5.491	7.692
最良評価値	4.308	4.897	7.165
平均	4.471	5.261	7.378

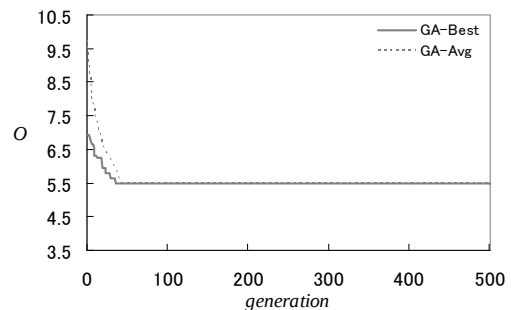


図-4 GA の解探索の推移

4. Memetic アルゴリズムによる中長期事業計画策定

4.1 Memetic アルゴリズム

MA は、GA に代表される進化型最適化手法による大域探索と問題領域の知識を利用した局所探索のハイブリッド手法である。GA においては、学習や経験により個体の遺伝子情報が変化することはない。これに対して、MA では、局所探索による学習や経験で遺伝子情報が変化する。このようなことから、GA などの従来手法と比較して、柔軟性の高い解探索を行うことができる。MA の解探索の流れは以下の通りである。

STEP1 初期世代の生成

STEP2 評価

STEP3 局所探索

STEP4 自然淘汰

STEP5 交叉・突然変異

終了条件を満たすまで STEP2 ～ 5 を繰り返す。

4.2 ボールドウィン効果を用いた制約充足

制約条件下において、MA は従来の制約充足法と異なり、局所探索とボールドウィン効果の考え方を用いることで、制約違反した解の情報を有効に活用した解探索を行う。本手法では、工事要素間の順序関係も年度予算や

工期と同様の制約条件として扱い、局所探索により順序関係の制約充足を試みる。なお、順序関係以外の制約条件に関しては、3.2 で述べた従来手法と同様の方法で制約充足を行うこととする。

まず、局所探索では、違反した遺伝子を次のように修復する。

- ・遺伝子列の左の工事要素から順に、その工事が先行工事などの施工開始条件を満たしているかどうか調べる。施工可能であれば、3.2 で述べたように、予算などの条件を満たしていれば、その年度に工事を施工することとする。一方、施工可能でない場合、待ち工事として、表-6 に示すようなリストへ追加し、次の工事要素が施工可能かどうか調べる。
- ・待ち工事となった工事要素は、年度毎の工事配分前に、リストの先頭から順に施工可能となったかどうか確認し、可能であればその年度に工事を施工することとする。待ち工事は、一つの待ち工事の施工が決定される度に、リストの先頭から工事要素が施工可能となったかどうか確認することとし、施工可能な工事要素がリストに存在しなければ、上述の手順で、遺伝子列から工事配分を行う。

上記の手順で修復を行った例を図-5 に示す。なお、修復例は、表-1 に示す先行工事例に対して年度毎の事業配分を行ったものである。また、図-5 の例で、修復後の遺伝子列は、4 年度の予定の工事が表-7 のように分けられたとした場合の修復例であり、そのときの年度毎の待ち工事リストを表-6 に示す。

修復前	2	5	1	4	8	3	6	9	7
修復後	2	1	5	4	3	6	7	8	9

図-5 遺伝子の修復例

表-6 待ち工事リスト

年度	待ち工事
1	5
2	8
3	8, 9

表-7 年度計画例

年度	施工工事
1	2, 1
2	5, 4, 3
3	6, 7
4	8, 9

図-5 において、修復前と修復後の遺伝子列で色が塗られている箇所は、先行工事の順序を違反している遺伝

子、および修復された遺伝子である。1 年目では、遺伝子列からの工事配分において、工事要素 5 を開始するためには、表-1 に示すように、工事要素 1 を完了する必要がある。待ち工事として次年度以降に施工することとする。2 年目では、遺伝子列からの工事配分を行う前に、表-6 に示すように、待ち工事として工事要素 5 が存在することから、工事要素 5 が施工可能かどうか調べる。この例では、工事要素 1 が 1 年目に完了していることから、工事要素 5 は 2 年目に行うものとして遺伝子列の順序が修復される。

このように、遺伝子が示す順序に対して、制約を満たすよう施工順序を修復することにより、順序関係の制約を満たすことができる。従来の制約充足法では、遺伝的操作の工夫により制約を満たすことから、個体群の多様性の欠如が問題となる。一方、この局所探索により修復する場合、遺伝的操作を工夫する必要がないため、多様性の問題を解決できると考えられる。

次に、ボールドウィン効果に基づき、修復した遺伝子により得られた適応度をその個体の適応度とするが、個体の遺伝子は修復前のものとする。すなわち、遺伝子情報として、適応度のみが変更されることになる²⁾。

生物の遺伝機構では、個体が後天的に適応や学習により獲得した能力は子孫へ遺伝しないと考えられている。これに対して、仮に獲得形質が遺伝することがなくても、適応や学習が進化を誘導・加速する可能性があるものとする。考える理論がボールドウィン効果である。本手法では、遺伝子修復による局所探索を環境に対する適応、または学習と捉え、その結果として得られた適応度のみを用いることで、ボールドウィン効果による進化を試みる。このときの個体の解空間上でのイメージ図を図-6 に示す。

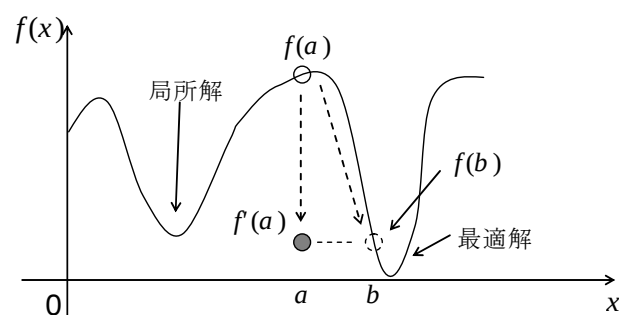


図-6 進化のイメージ

図-6 において、 x が個体の設計変数、 $f(x)$ がその目的関数値を表す。ここで、個体の設計変数が a のとき、局所探索後の設計変数を b とすると、本手法とは異なり、個体の遺伝子を b へと置き換える場合の解は $f(b)$ というように必ず目的関数上に存在する。これに対して、本手法では、個体の適応度のみが変化することから、 $f'(a)$ という仮想的な解を表すことになる。

ペナルティ関数法や古田らの用いた従来手法では、3.4 で述べたように局所解近辺から離れた位置の個体が生成される可能性が低く、また、生成されたとしても制約による影響から淘汰される可能性が高い。そのため、世代を重ねるにつれて淘汰により個体群の多様性が失われ、大域探索が困難となる。

一方、本手法では、図-6 の $f'(a)$ のように、個体の設計変数と目的関数値が一致しない仮想的な解が存在することから、制約違反した個体の遺伝子情報を解探索へ活かすことが可能となる。もし $f(b)$ のように局所探索によって遺伝子を変化させた場合、 a の近傍も局所探索により b へと修復される可能性があり、問題空間が複雑であれば個体群の多様性の維持が困難となる。これに対して、個体の適応度のみを変化させた場合、遺伝子は変化しないことから、同じ適応度を持つ個体同士であっても異なる遺伝子を持つことができる。このようなことから、局所探索により進化の方向性を定め、個体群の多様性を維持しながら解探索を行うことができると考えられる。また、多くの制約条件が存在する問題空間では、局所解から最適解への探索空間が制約条件によって大きく離れている可能性がある。この場合、従来手法では制約違反した解は実行不可能解として淘汰されるため、最適解の探索が困難となる。しかし、本手法では、制約違反した解も存在することから、制約違反した解の情報を用いて解探索できると考えられる。

4.3 数値計算例、および適用結果

3.3 で述べた問題へ、本研究の手法を適用し、比較検討を行うことにより、本手法の有用性を検証する。

数値実験に用いたパラメータを表-8 に示す。

表-8 数値実験のパラメータ

手法	GA	MA
個体数	2000	2000
交叉率	0.8	0.6
突然変異率	0.00	0.01
最大世代数	500	500

MA で用いる突然変異として、ランダムに選択された箇所の遺伝子列の値を入れ替えることとする。

GA と同様に 20 回ずつ試行して得られた MA による結果を表-9, 10, 11 に示す。

表-9 小規模における計算結果

手法	GA	MA
最悪評価値	4.744	4.519
最良評価値	4.308	4.218
平均	4.471	4.320

表-10 中規模における計算結果

手法	GA	MA
最悪評価値	6.129	4.956
最良評価値	5.472	4.376
平均	5.895	4.680

表-11 大規模における計算結果

手法	GA	MA
最悪評価値	7.692	6.420
最良評価値	7.165	5.668
平均	7.378	5.952

表-9, 10, 11 から分かるように、MA により得られた解は、すべての問題規模において、GA を適用した解と比較して、優れた結果となっている。まず、問題の規模が小さいとき、MA の方が優れた結果が得られているが、GA の結果と比較して大差はない。このことから、問題規模が小さいときには、GA と MA の解探索性能は同等である。次に、問題規模が大きくなったとき、表-10, 11 から分かるように、GA と MA の結果に差が見られる。これは、GA による解探索が局所解へ収束していることを表している。中規模の問題において、GA と MA により最良の評価値を示した解が得られたときの解探索の推移を図-7 に示す。

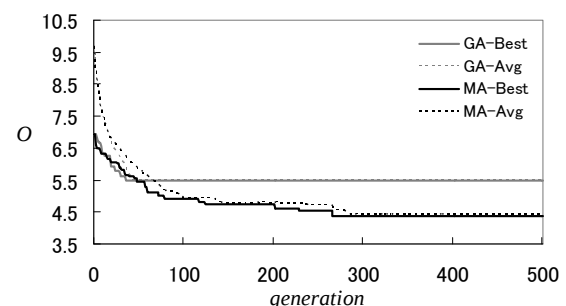


図-7 解探索の推移

図-7 より、GA の解探索は早期に収束しているのに対して、MA ではさらに良い評価値を持つ解を探索することができている。多制約条件下では、すべての制約条件を満たした遺伝子列が、制約違反した遺伝子列と比較して非常に少ない。このような条件下において、GA の解探索では、3.4 で述べた理由から、実用的ではないと言える。一方、MA による制約充足は、制約違反した解の情報を用いて解探索を行えることから、非常に有効であると考えられる。また、計算時間に関して、中規模の問題における計算時間は、実験に用いた PC (Intel Core2 Quad 2.66GHz, メモリ 4GB, Windows Vista) 上では、両手法ともに約一分で解探索が終了している。これは、提案手法では個体ごとの評価値計算と並行して局所探

索が行われるので、GA と同等の時間で評価値を計算できるからである。最適解が収束するまでに要する時間は、図-7 に示すように、従来手法と比較して、より多くの世代数を必要とする。しかしながら、実用面から考慮すると、表-9, 10, 11 から分かるように、それぞれの最適解の平均値に差が見られることから、提案手法の有用性は損なわれなとと考えられる。提案手法は、一度の試行に多くの世代数を必要とするが、探索精度の面では従来手法により優れている。一方、何度も試行を繰り返すことで、GA でも MA と同等の最良解を探索することは可能であり、表-9 から分かるように、小規模の問題では MA と同等の解が得られている。実問題規模の問題へ適用する場合、解の精度と試行回数から考慮して、提案手法の方がより有用であると考えられる。

中規模の問題において得られた最良解により策定されるアローダイアグラムとその計画の詳細を、GA については図-8 と表-12 に、MA については図-9 と表-13 に示す。GA と MA によって策定された計画の違いとして、各事業を開始してから終了するまでの期間が挙げられる。GA により策定された計画では、ある事業の工事を開始してから何も行わない年度が存在し、各々の事業が完了する時期が送れる原因となっている。これに対して、MA により策定された計画では、各事業に何も行わない年度がなく、各々の事業を早期に完了させることで、より評価値の高い計画を策定することができている。

この問題では、順序関係だけでなく、年度予算や工期の制約が存在することから、従来の制約充足法では解探索が困難となる。一方、MA による制約充足では、局所探索とボールドウィン効果を用いることにより、個体群の多様性を損なうことなく解探索を行うことができると考えられる。

5. おわりに

本研究では、街路や橋梁の整備、維持、および補修計画などの中長期にわたる公共事業の計画策定において、各事業の工事要素間の順序関係や年度予算の制約を満たした、より有用な計画案の策定を試みた。そして MA を適用した結果、従来の GA を用いる方法と比較して、複雑な制約条件下においてより実用的な計画を策定し、本手法の有用性を示すことができた。以下に、本論文で得られた結論と今後の課題をまとめて示す。

1. 従来研究の GA による解法では、一般的な制約充足法を用いていた。そのため、解探索の範囲が狭まり、局所解に陥る可能性が高いという問題を明確にした。
2. 本研究では、多制約条件下における解の探索精度の向上のために、遺伝子修復とボールドウィン効果を用いた局所探索によって、制約違反した解の

情報を利用した解探索を行うことができる MA により、より実用的な計画策定を試みた。異なる規模の3つの計算例へ適用し、MA を用いることで、GA と比較して、良い結果を得ることができた。

3. 問題規模が小さいときには、GA と MA の解探索精度に大差はないが、問題の規模が大きくなることで、得られる解に差が現れることから、本手法が非常に有効であることを示した。
4. 制約条件下において、MA では、遺伝子修復により制約充足を行う手法であり、本研究では、工事の順序関係に対して遺伝子修復による充足を試みた。本研究では、遺伝子修復においては扱っていないが、年度予算や工期による年度配分などの制約についても、遺伝子修復に組み込むことが可能であり、また、制約以外にも、計画策定において有効と考えられる規則を組み込むことで、さらなる改善ができると考えられる。
5. 従来方法であるペナルティ関数法やコーディングの工夫による制約充足は、その設計を試行錯誤的に行う必要があり、実問題規模の問題では、適用が難しいという問題がある。これに対して、MA では、コーディングの工夫を必要とせず、局所探索により制約充足を試みることから、設計者は局所探索の設計を行うことだけで、制約を満たした解を探索することができる。そのため、MA による制約充足は、アルゴリズムのシンプルさと探索精度の両面から、非常に有効であると考えられる。
6. MA は、解探索における個体群の収束具合から、GA と比較してより多くの計算時間を必要とする。しかしながら、個体群の多様性を維持しながら大域探索を行うことができるので、一度の試行から得られる解の精度は優れている。実用の際には、計算時間だけでなく、適用する手法のパラメータ設計なども限られた時間内に行うことが求められており、提案手法は、制約充足などの面で従来手法より容易に設計できる。このようなことから、実用面から考慮して有用であると考えられる。

今後の課題として以下のものが挙げられる。

1. 本研究では、例題により本手法の有用性を示すことができた。しかしながら、実問題ではさらに多くの制約が存在する。そのため、実問題における有用性について、今後検討を行う必要がある。
2. 本研究で扱った中長期事業計画問題のように、土木に関連した最適化問題では、複雑な制約条件が存在することが一般的である。このような問題において、MA の制約充足は有効であると考えられることから、他の問題においても有用性を検証する必要がある。
3. 本研究で扱った中長期事業計画問題は、古田らの研究により、すべての制約を充足する解が存在す

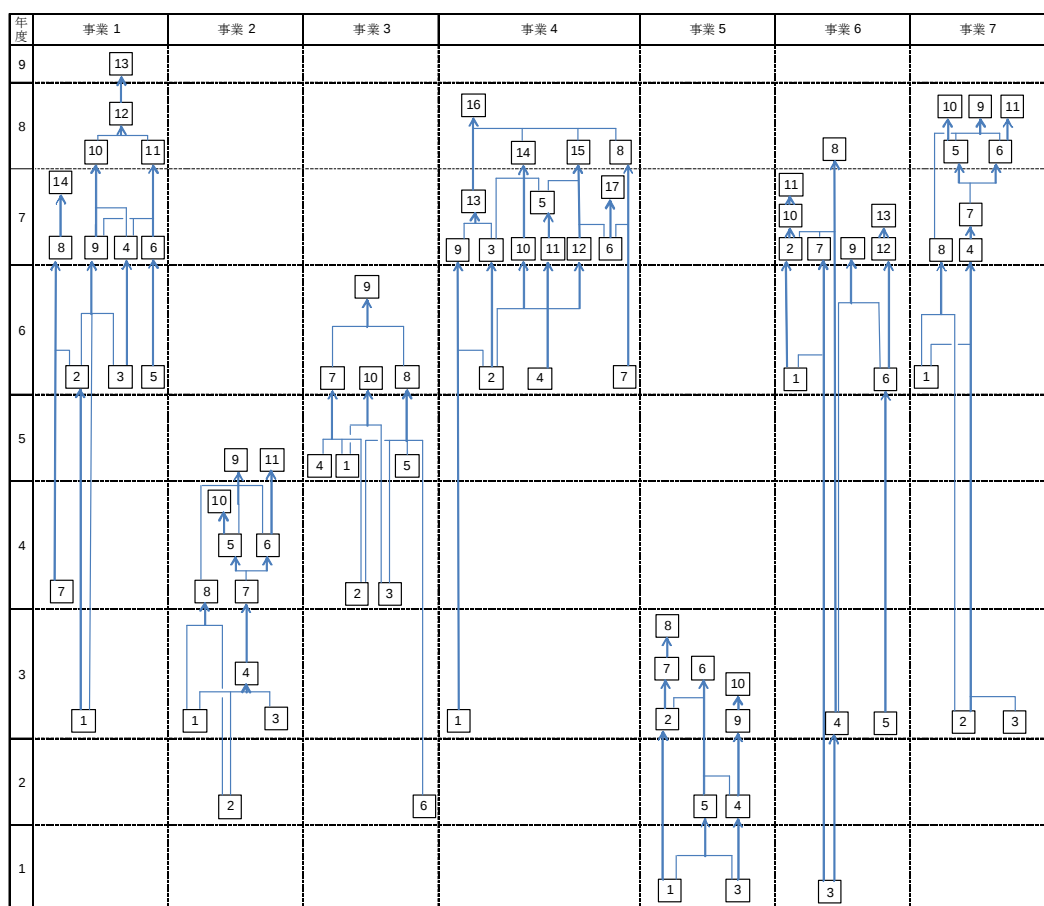


図-8 GAにより得られたアローダイアグラム

表-12 GAにより得られた計画の詳細

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
事業 番号	1		1	7		2, 3, 5	4, 6, 8 9, 14	10 - 12	13
	2	2	1, 3, 4	5-8 10	9, 11				
	3	6		2, 3	1, 4, 5	7-10			
	4		1			2, 4, 7	3, 5, 6 9-13 17	8 14-16	
	5	1, 3	4, 5	2 6-10					
	6	3	4, 5			1, 6	2, 7 9-13	8	
	7		2, 3			1	4, 7, 8	5, 6 9-11	
総工費	355	1395	2265	2870	3710	3870	5825	3290	40
年度予算	500	1500	2500	3500	4500	4500	6000	6000	6000
最大工期	9	9	12	12	12	12	12	6	3

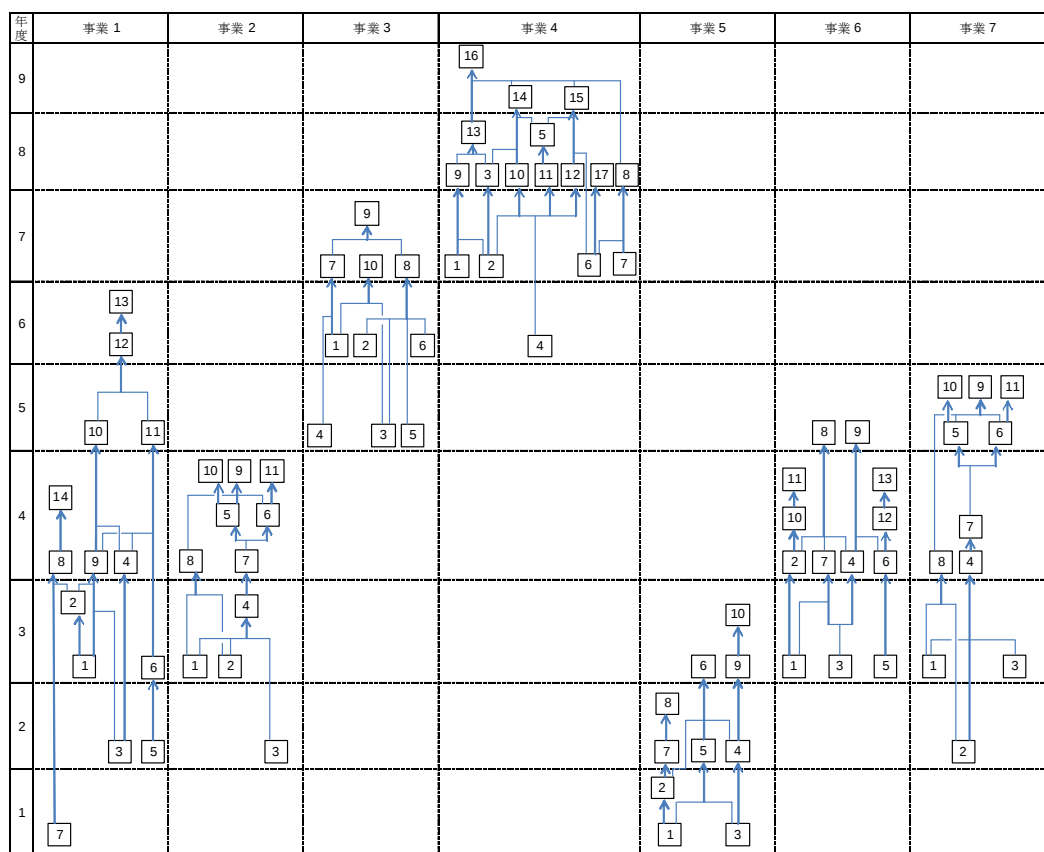


図-9 MAにより得られたアローダイアグラム

表-13 MAにより得られた計画の詳細

年度		1	2	3	4	5	6	7	8	9
事業 番号	1	7	3, 5	1, 2, 6	4, 8, 9 14	10, 11	12, 13			
	2		3	1, 2, 4	5 - 11					
	3					3, 4, 5	1, 2, 6	7 - 10		
	4						4	1, 2, 6 7	3, 5 8 - 13 17	14 - 16
	5	1 - 3	4, 5, 7 8	6, 9, 10						
	6			1, 3, 5	2, 4, 6 7 10 - 13	8, 9				
	7		2	1, 3	4, 7, 8	5, 6 9 - 11				
総工費		385	1480	2370	3440	4485	4290	3850	2560	760
年度予算		500	1500	2500	3500	4500	4500	6000	6000	6000
最大工期		12	9	12	12	12	12	12	12	9

ることが示されていた。しかし、より複雑な問題へ適用した場合、すべての制約を充足できる解が存在しない可能性も考えられる。また、局所探索により制約充足することが困難なものも考えられることから、さらなる有用性の検証が必要である。

参考文献

- 1) 古田, 杉本, 井下, 横田, 廣瀬, 中谷, 中長期事業計画問題への GA の応用, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp497-502, 1998.
- 2) 相吉英太郎, 安田恵一郎, メタヒューリスティクスと応用, 電気学会, pp15-27, 2007.
- 3) Moscato, P.: Memetic algorithms: A short introduction, *New Ideas in Optimization*, Come, D., Glover, F. and Dorigo, M. (Eds.), pp219-234, McGraw-Hill, Maidenhead, 1999.
- 4) Kim, W. C. Ku: Enhance the Baldwin Effect by Strengthening the Correlation between Genetic Operators and Learning Methods, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp3302-3308, 2006.
- 5) Hart, W.E., Krasnogor, N. and Smith, J. (Eds.): *1st Workshop on Memetic Algorithms (WOMA I)*, *Proc. 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conf. Workshop Program*, pp95-130, 2000.
- 6) Hart, W.E., Krasnogor, N. and Smith, J. (Eds.): *2nd Workshop on Memetic Algorithms (WOMA II)*, *Proc. 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conf. Workshop Program*, pp137-179, 2001.
- 7) Hart, W.E., Krasnogor, N. and Smith, J. (Eds.): *3rd Workshop on Memetic Algorithms (WOMA III)*, 2002.
- 8) Merz, P., Hart, W.E., Krasnogor, N. and Smith, J. (Eds.): *4th Workshop on Memetic Algorithms (WOMA IV)*, *Proc. 2003 Genetic and Evolutionary Computation Conf. Workshop Program*, pp215-239, 2003.

(2009 年 9 月 24 日受付)