

遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる 橋梁維持管理計画最適化の検証

Optimization of Bridge Maintenance Strategies by Using GA and IA Techniques

中村秀明*, 河村 圭**, 鬼丸浩幸***, 宮本文穂****

Hideaki Nakamura, Kei Kawamura, Hiroyuki Onimaru, Ayaho Miyamoto

*正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

**正会員 博士(工学) 山口大学VBL非常勤研究員 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

***学生員 工学士 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

****正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

The authors have been developing a Bridge Management System (J-BMS) integrated with the Concrete Bridge Rating Expert System that can be used to evaluate the serviceability of existing concrete bridges. In this study, in order to verify the accuracy of optimum solution, the optimum solution obtained by using the brute force method and the SGA are compared. Furthermore, the Immune Algorithm (IA) was applied as another optimization method instead of the SGA. It was found that the reliability of the optimum solution obtained by using the SGA decreased gradually as the maintenance period became longer. However, the IA is able to provide more accurate solutions than can the SGA. As well, the IA is able to obtain plural semi-optimum solutions which allow the designers to select an adequate maintenance plan.

Key Words: Bridge Management System(BMS), maintenance strategy, genetic algorithm(GA), immune algorithm(IA)

1. はじめに

橋梁の新設および架け替えは、戦後の高度経済成長時期にその多くがなされており、これらの橋梁の多くは現在も供用されている。これらの橋梁の中には、経年による老朽化と近年の交通量の増加や車両の大型化により、劣化や損傷の度合いが著しく、補修・補強および架け替え等が必要なものも増大している。しかしながら、これら橋梁の維持管理に使える予算には上限があり、必要とされる維持管理対策をすべて行えば、橋梁を新設する建設費を圧迫する事態になることが考えられる。そこで、定期的な点検を行い、限られた予算内で合理的かつ効率的な維持管理対策を施すことは、長期間にわたって橋梁を供用していく上で極めて重要なことである¹⁾。

このような背景のもと、本研究室では、以前より橋梁に対する様々な維持管理業務の支援を可能とする統合型支援システムとして「橋梁維持管理支援システム; Bridge Management System(J-BMS)」(以下、本 J-BMS と略記する)の開発を行ってきた^{2), 3), 4)}。J-BMS の最終的な目標は、道路網を構成する橋梁全

体をネットワークとして捉え、限られた予算の中で最大の効果を得るための最適な維持管理計画案の作成を支援することである。しかしながら、現段階では、ネットワークレベルで橋梁を管理できるほどの点検データが十分に整備されていないことや、はじめからネットワークレベルでの橋梁管理を考えると、システムが大規模で非常に複雑になるため、本 J-BMS では、開発の第1段階として橋梁の維持管理を1橋レベルで考慮している。現在までに開発された J-BMS は、既存橋梁の劣化診断ならびに診断結果に基づく劣化予測を行う機能、経済性および橋梁部材の品質を考慮した最適な維持管理計画を策定する機能、さらに劣化要因を考慮した維持管理対策を選定する機能を有している。

これらの機能のうちメンテナンスプラン最適化機能は、既存橋梁の劣化診断の結果および劣化予測の結果に基づき、経済性および橋梁部材の品質を考慮した経年的な補修・補強工法の選定、すなわち最適な維持管理計画を策定する機能である。本 J-BMS では、このメンテナンスプラン最適化機能における最適化手法には遺伝的アルゴリズム^{5), 6)} (GAs) のうち

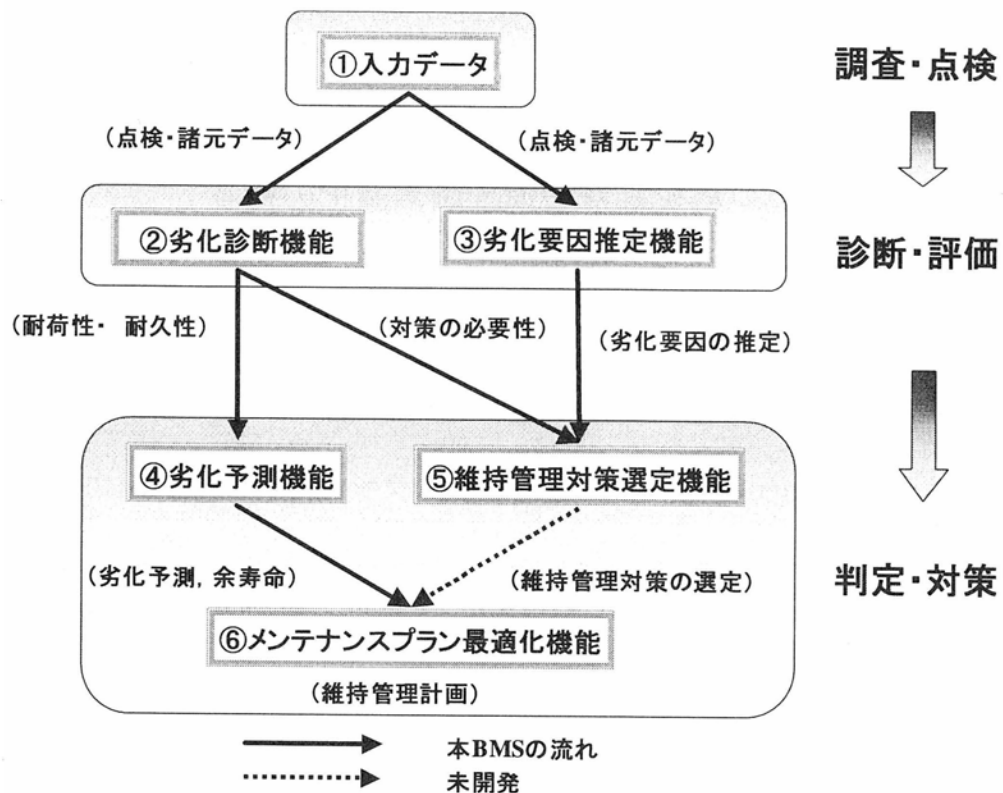


図-1 J-BMS との関連

最もアルゴリズムが単純な Simple-GA(SGA)を用いている。SGA はアルゴリズムが単純であり、高速に解を求めることができることが長所であるが、局所解に陥りやすく準最適解が 1 つしか出力されない短所もある。そこで、その精度を検証するため、SGA による準最適解としらみつぶし法によって求めた厳密解とを比較した。また、SGA に代わる最適化手法として免疫アルゴリズム^{7),8)} (IA) を適用し、その結果についても比較・検証を行った。

本研究の結果、SGA による最適化では維持管理を行う期間が長くなるほど、最適解を出力する頻度は減っていき、実際の維持管理業務で考慮するような期間ではその信頼性が低くなることを検証できた。そこで、より高い信頼性を確保するため本機能における最適化に IA を適用した。その結果、SGA では最適解を出力することができなかつた期間についても最適解を出力することができ、SGA よりも信頼性が高いことが検証できた。また、IA では複数の維持管理計画案を示すことができ、ユーザの選択範囲の広い結果を示すことができた。

2. J-BMS における本最適化機能の位置づけ

メンテナンスプラン最適化機能は、著者らが従来より開発している Bridge Management System

(J-BMS)^{2),3),4)}の一機能である。本機能とJ-BMSとの関連は、図-1のように表すことができる。まず、橋梁諸元および点検データなどの対象橋梁に関するデータを入力する。次にこれらのデータを基に「劣化診断機能」により現在の劣化状況が診断される。さらにこれらの診断結果を用いてこれからの劣化の進行状況を「劣化予測機能」により予想劣化曲線を仮定して予測する。さらにその結果を「メンテナンスプラン最適化機能」に用いることで、対象橋梁に対する補修・補強計画を提示する。

3. 既存橋梁の補修・補強計画

3.1 橋梁に対する維持管理対策

本J-BMSでは、橋梁の劣化程度を表す性能指標として「耐久性」および「耐荷性」の2つを定義している。「耐久性」は材料劣化に対する抵抗性であり、「耐荷性」は構造体の耐力低下に対する抵抗性である。これら2つは本来相互に関連させて考えるべきであるが、これら2つを関連させて考えるとあまりにも複雑になり、システムとして構築することが困難であることから本J-BMSでは、独立なものとして取り扱っている。この2つの性能指標に対する対策として、メンテナンスプラン最適化機能では、橋梁に施す工法を「補修」と「補強」のカテゴリーに区

表-1 維持管理対策のコーディングの例（主桁）

コード	主桁の維持管理対策	工費(U)
0110	②樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復	A) 23.8 B) 33.6
1000	③ガラスクロス+樹脂注入 or ガラスクロス+樹脂注入+断面修復	A) 44.8 B) 54.6
1101	④モルタル吹付け+樹脂注入 or モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復	A) 33.6 B) 43.4
0010	⑤FRP 4枚（鋼板）接着+樹脂注入 or FRP 4枚（鋼板）接着+樹脂注入+断面修復	A) 132.1 B) 141.9
0100	⑥FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復	A) 97.6 B) 107.4
1100	⑦外ケーブル	150.0
0111	⑧外ケーブル+樹脂注入 or 外ケーブル+樹脂注入+断面修復	A) 169.6 B) 179.4
1001	⑨外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入 or 外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入+断面修復	A) 190.6 B) 200.4
0011	⑩外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入 or 外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復	A) 179.4 B) 189.2
others	①補修・補強をしない	0

表-2 維持管理対策のコーディングの例（床版）

コード	床版の維持管理対策	工費(U)
0110	②樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復	A) 23.8 B) 33.6
0010	③FRP 4枚（鋼板）接着+樹脂注入 or FRP 4枚（鋼板）接着+樹脂注入+断面修復	A) 94.6 B) 104.0
0100	④FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復	A) 71.6 B) 81.4
1100	⑤縦桁増設	44.3
1011	⑥縦桁増設+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復	A) 63.9 B) 73.7
0111	⑦床版増厚	43.0
1000	⑧床版増厚+樹脂注入 or 床版増厚+樹脂注入+断面修復	A) 62.6 B) 72.4
0011	⑨床版打替え	45.0
others	①補修・補強をしない	0

注1) 表中のA)とB)の区別は、「耐久性」の平均健全度の値が50以上の場合はA)が選択され、50未満の場合はB)が選択される。

注2) 表中の工費の単位(U:ユニット)は約¥1,000/m²を表す。

分し整理した。本研究での「補修」と「補強」についての定義の概略は、「補修」は耐久性の劣化に対する処置、「補強」は耐荷性の劣化に対する処置として、この定義をもとに本システムで対象としている橋梁部材である主桁および床版のそれぞれに対して用いられている代表的な工法をリストアップし、その特徴から補修、補強に区分した。次に、実際に施される補修・補強工法の組み合わせを1つの維持管理対策としてとらえ、それぞれの部材に対する維持管理対策を表-1および表-2のように整理した。

3.2 補修・補強計画のモデル化

既存橋梁の補修・補強計画を最適化するには多くのことを考慮しなくてはならない。その指標として考慮すべきものには経済性だけでなく安全性、

機能性、環境性、耐震性など多くのものが考えられ、それらを考慮に入れた計画が真に最適であると言える。しかしそれらすべてを考慮に入れることは非常に困難であるため、本システムで考慮する最適化指標としては、経済性と品質指標の2つを考慮した。ここで経済性とは実際に橋梁の維持管理にかかる費用、すなわち補修・補強費用と定期点検費用の2つの合計を経済性とした。橋梁の品質には多くの考え方があるが、本システムにおいては耐久性と耐荷性の2つの指標を考慮したものを橋梁の品質を表す指標として採用した。

また、補修・補強計画の最適化は、図-2に示されるように経年ごとに考慮される数種類の維持管理対策を、いつ、どのような組み合わせで行えば、最も効率良く維持管理を行っていきけるか、という組み合

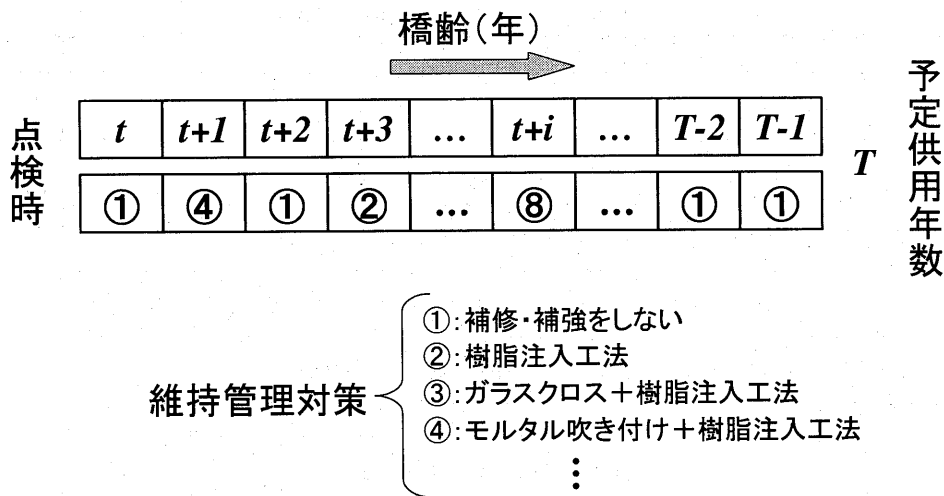


図-2 維持管理計画のモデル化

わせ最適化問題としてモデル化することができる。このように、本システムでは、既存橋梁の補修・補強計画の最適化問題は、多目的な組み合わせ最適化問題としてとらえられるとして最適化を行った。

3.3 最適化のアルゴリズム

本研究で考慮した最適化指標は、前に述べたように経済性と品質指標の2つである。全く異なる2つの指標を同時に最適化することは、非常に困難であるため、これを多目的な最適化問題として「ε制限法⁹⁾」を組み合わせ多段階に最適化を行った。以下にそのアルゴリズムを述べる。

- ① まず、経済性だけを考慮に入れて総費用の最小化を目的とした最適化を行う。この場合の目的関数と制約条件は以下のように定義できる。

$$\text{【目的関数】 } F = \sum_{t=t}^{T-1} C_{ij} \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

$$\text{【制約条件】 } \left. \begin{array}{l} f(t) > 0 \\ g(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここで、

- t : 橋齢 (年)
- j : 行う対策の種類 ($j=1 \sim 9$ or 10)
- t' : 現在の橋齢 (年)
- T : 予定供用年数 (年)
- $f(t)$: 橋齢 t 年における耐荷性の平均健全度
- $g(t)$: 橋齢 t 年における耐久性の平均健全度
- C_{ij} : 橋齢 t 年に行う維持管理対策 j および定期点検を行うために必要な費用

である。維持管理対策 j の種類は、主桁または床版のどちらの場合について最適化を行うかによって異なり、主桁の場合では10通り、床版では9通りの対策を

考慮している。①で求めた補修・補強計画に必要な費用をcost 1として記憶しておく。

- ② 次に品質の最大化を目的とした最適化を行う。品質指標を含めた場合の目的関数は、上記の目的関数で最適化した際に求めた cost 1を参考にして、橋梁管理者が望む許容範囲内である上乗せ予算 α を決め、cost 1と α の合計をトータルコストの上限 ε として定める。この場合の目的関数は、

$$\text{【目的関数】 } F = \sum_{t=t}^{T-1} \{f(t) + g(t)\} \rightarrow \text{Max} \quad (3)$$

$$\text{【制約条件】 } \sum_{t=t}^{T-1} C_{ij} \leq \varepsilon \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} f(t) > 0 \\ g(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{array} \right\} \quad (5)$$

- ③ ②の上乗せ予算額 α を変化させて②を繰り返すことで、様々な補修・補強計画を提示することができる。

4. 維持管理計画最適化の検証

本 J-BMS のメンテナンスプラン最適化機能における最適化手法には SGA を用いている。SGA はアルゴリズムが単純であり、高速に解を求めることができることが長所であるが、局所解に陥りやすく準最適解が1つしか出力されない短所もある。そこで、その精度を検証するため、SGAによる準最適解とらみつづし法によって求めた厳密解を比較した。また、SGAに代わる最適化手法としてIAを適用し、その結果についても比較・検証を行った。なお、メ

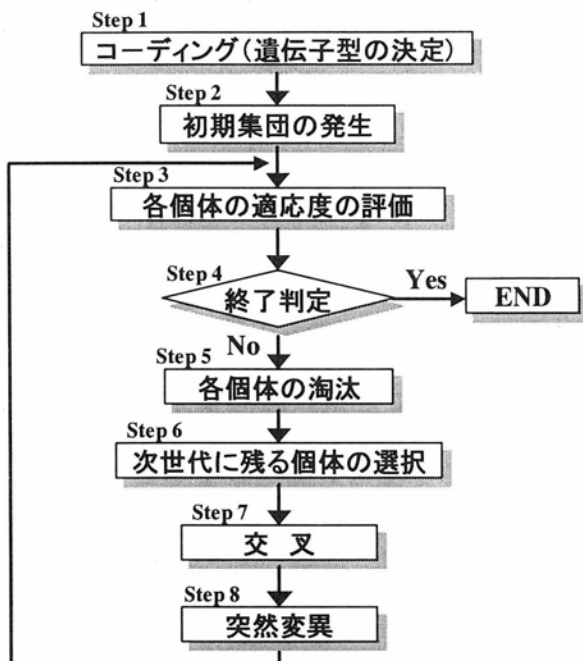


図-3 GAsの基本的なアルゴリズム

メンテナンスプラン最適化機能では、前述したようにコスト最小化と品質最大化の2段階の最適化を行っているが、検証では、コスト最小化の結果を比較した。

4.1 GAsの概要

GAsとは、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものである。高等生物では、親から子へ遺伝子によって生物としての情報が伝わり、次世代では各個体の中でもより優れた、つまり環境への適応度の高い個体の遺伝情報が優先的に伝えられる。同時に適応度の低い個体は自然淘汰される。また、遺伝子のコピーを行う際に微妙なエラーを生じることもあり、生物の多様性が広がる。これが遺伝と進化の基本的な原理である。GAsは、組み合わせ最適化問題の解法として使われる事が多い。具体的には、対象となる問題の解候補を遺伝子列(個体)として表現し、これら個体群に遺伝的操作を行い世代交代する。この繰り返しによって確率的に最適な解を求めようとする手法である。GAsの長所としては、複数の個体間で選択や交叉などの遺伝的操作によって相互協力的に解の探索を行うため、単純な並列的解探索に比べてより良い解が高速に見つかりやすい。また、個体の適応度のみが分かれば良いことから、アルゴリズムが単純で面倒な微分演算などは不要である。逆に短所としては、対象となる問題を遺伝的アルゴリズムで解くための一般的な方法がないことが挙げられる。GAsの詳細については文献5)、6)に譲る。GAsの基本的なアルゴリズムは、以下のように示される。(図-3参照)

【Step 1】 遺伝子型の決定 (コーディング)

GAsの遺伝子の要素は、DNAではなく記号列である。対象とする問題の解候補を記号列へ変換(コーディング)する。

【Step 2】 初期遺伝子集団の発生

決められた遺伝子型で、要素が異なる様々な個体をランダムに発生させる。

【Step 3】 各個体の適応度の評価

各個体の適応度をあらかじめ定めた方法で計算する。

【Step 4】 終了判定

最終世代数に達するか、あるいは解の探索が十分行われたなら計算を終了する。

【Step 5】 各個体の淘汰

Step 3で得られた適応度(評価値)をもとに各個体を適応度順に並び換え、次の世代へ残すかどうかの選択を行う。

【Step 6】 次世代に残る個体の選択

Step 5で淘汰した結果、総個体数は最初より減る。そこで、減少分を残った個体の中からある個体を一定比率で選択し、増殖させる。

【Step 7】 交叉

遺伝子を組み替えて、新しい個体を発生させる。

【Step 8】 突然変異

個体を形成する遺伝子列のうちある遺伝子の値を強制的に変えて、遺伝子集団としての多様性を大きくする。

以上Step 3からStep 8までを終了判定を満足するまで行う。

4.2 維持管理対策のコーディング

SGAにおける解の探索は、個体という記号列を用いて行うため、対象の問題を記号列の形に置き換える(コーディングする)必要がある。本システムでは、遺伝子は維持管理対策(決定変数)を表し、個体は維持管理計画を表現するものとした。主桁に対して年度ごとに取り得る維持管理対策の種類は10通りある(表-1参照)ことから各対策を2進数で表現しようとする4bit必要となる。しかし、その場合16通りの表現ができることから2進数コードと各対策を1対1で対応付けることができない。この表現方法のままでは致死遺伝子を持つ個体が発生し計算効率が悪くなるため、維持管理対策①(補修・補強をしない)は他の維持管理対策よりも頻繁に選択されることが考えられることから、余りの6つのコードもすべて対策①に対応付けることにした。また、突然変異の方法は、4bitコードのうち1bitを選択し、その値を反転させるとする。ここで、突然変異が起こったときにある対策が変わり得る対策の数は、ハミング距離が1

表-3 計算に用いた GAs のパラメータ

項目	パラメータの値, 手法
個体数	30
世代数	300
突然変異率	10%
選択手法	トーナメント方式+エリート保存方式
交叉手法	1点交叉
交叉率	100%
終了条件	世代交代数=世代数

である4つの対策だけであることからコードと対策の種別との対応付けにも気をつけなければならない。以上のことを考慮して、維持管理対策を表-1, 2のように2進数で表現した。

4.3 適応度の計算方法

個体はそれ自身が1つの維持管理計画を表現していることから、その維持管理計画に必要な総費用は表-1, 2の工費より求まる。経済性を考慮して最適化する場合、式(1)より目的関数 F が総費用の最小化であることから、求めた総費用の逆数を個体の適応度の値として用いる。また、品質指標を最適化する場合は、予想劣化曲線によって経年ごとの耐荷性と耐久性の平均健全度が求まることから、式(3)よりその合計値を個体の適応度の値として用いる。ここで、制約条件を満たさなかった個体にはペナルティを与え、次世代の親として選択される確率を低くする。その条件は以下の通りである。

- ・式(2),(5)の制約条件を満たさなくなったとき、すなわち耐荷性あるいは耐久性の平均健全度が0以下になったとき。
→総費用に5000(U)を加える。
- ・式(4)の場合において、必要な総費用が維持管理者の定めたコストの上限を超えてしまったとき。
→適応度を0にする。

4.4 SGA の各パラメータの設定

表-3にSGAで用いた各パラメータの設定値を示す。各パラメータのうち、集団数、世代数、突然変異率は試行錯誤により定めたもので、交叉手法、終了条件などは代表的なものを用いた。選択手法に関しては、適応度の大小だけで選択を行うため適応度の値が直接に反映されやすく、計算効率の面からも優れているトーナメント方式を採用した。また、この方式にエリート保存方式を組み合わせることにより、良い解が探索途中で淘汰されるのを防ぎ、より最適な解が出力されるケースが多かったため、この組み合わせを採用した。

表-4 厳密解との比較

維持管理計画の期間(年)	厳密解 (U)	GAによる準最適解 (U)
5	61.4	61.4[8], 71.2[1], 81.0[1]
6	61.4	61.4[7], 71.2[2], 82.4[1]
7	61.4	61.4[3], 71.2[3], 82.4[1], 111.4[3]
8	89.2	89.2[2], 99.0[2], 108.8[3], 111.4[2]

注) 表中の[]内の数値は、10回の試行で出力された頻度

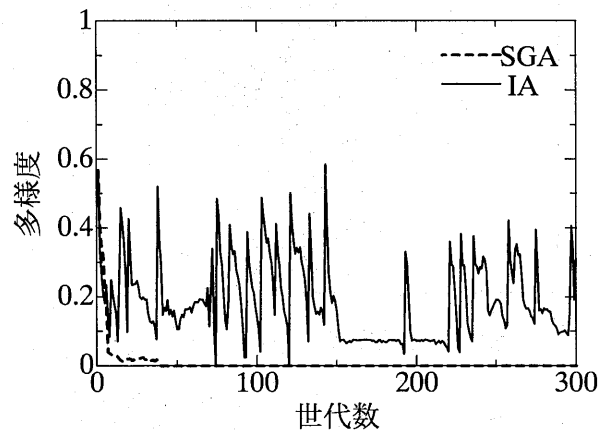


図-4 SGA と IA の多様度の推移

4.5 厳密解との比較および検証

表-4に本 J-BMS のメンテナンスプラン最適化機能のコスト最小化モード(主桁対象)によって求めた維持管理計画にかかるトータルコスト、すなわち準最適解としらみつぶし法で求めた厳密解について出力結果を示す。また、維持管理計画の期間が8年の場合について SGA の多様度⁷⁾の推移を図-4に示す。多様度とは個体の多様性を測定する尺度であり、多様度が1の場合には全ての個体は全く異なったものであり、多様度が0の場合には全ての個体は全く同じものとなる。個体集団の多様性の尺度である多様度は、個体間のハミング距離や情報エントロピーの概念¹⁰⁾を応用して求めることができる。本研究では、情報エントロピーの概念を用いて多様度を次のような手順で計算している⁷⁾。M個の遺伝子をもつN個の個体により個体群が構成されており、個体のとりうる記号がS個存在する。このとき個体の遺伝子座jの情報エントロピー $H_j(N)$ は次式で表される。

$$H_j(N) = \sum_{i=1}^S (-p_{ij} \log p_{ij}) \quad (6)$$

ここで、

$$p_{ij} = \frac{\text{(遺伝子座 } j \text{ に出現した } i \text{ 番目の記号の総数)}}{N}$$

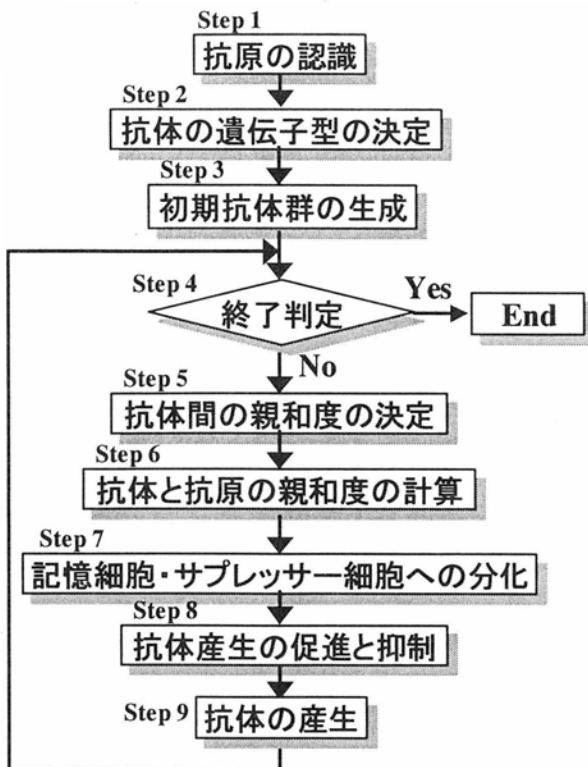


図-5 IAの基本的なアルゴリズム

したがって、個体群の多様性の平均エントロピー $H(N)$ は次式で表され、個体群の多様性を測定することができる。

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M H_i(N) \quad (7)$$

図-4によるとSGAでは手法特有の初期収束により比較的早い世代で多様性を喪失し、同じような類似度の高い個体集団に収束している。表-4を見ると維持管理計画が短い段階では最適解が出力されることが多いが、期間が長くなると解の探索範囲が広くなるため、準最適解が1つしか出力されないSGAでは初期収束を起こしやすく局所解に陥ってしまう。そのため、解が不安定になり最適解が出力されない場合が多くなる。維持管理計画の期間が8年の場合には、しらみつぶし法での総組み合わせ数は、 $10^8 = 1$ 億通りとなる。CPUがPentium III 1GHz、メモリ256MBの計算機を使用してSGAで30個体×300世代の計算を行ったところ計算時間は約3secであった。しらみつぶし法では確実に厳密解を求めることができるが、計算時間が年数に対して指数的に増えていくことから長期的な計画の作成には適していない。また、同じ工法の組み合わせで工法の施工年が違う場合には、コストが最小値となる組み合わせが複数存在する。この場合、準最適解が1つしか出力され

ないSGAでは不十分であると思われる。そこで、解の多様性を維持するとともに複数の準最適解を得ることが可能なIAの適用を試みる。

4.6 IAの概要

生体の持つ免疫システムに基づいた最適化手法としてIAがある。免疫には、生体を抗原から守るために免疫細胞が自己と抗原を識別する機能と病原菌や病気等のために変化した自己成分を排除する機能が備わっている。また、免疫システムには、自己に対しても免疫性を示し、同一種類の抗体が大量に産生（産生：生産と同じ、細胞による高分子物質の生合成）されたとき、抗体産生を抑制する機能を持つサブレッサー細胞によりその抗体と同種類の抗体の産生を抑制し、状態のバランスをとる機能を有している。IAはこの免疫システムの抗体産生機構とその自己調節機構を工学的にモデル化したアルゴリズムである。これらの機構は、解の多様性を維持することを可能とするものであり、解の多様性を維持することは初期収束を起こしにくくし、局所解に陥ることを少なくする働きをする。さらに、IAにより求めた準最適解は逐次記憶細胞に保存されていくため複数の準最適解を求めることも可能である。しかし、IAには各世代において全抗体について各抗体間の親和度(類似性)を計算する必要があるため、SGAと比較すると計算に時間がかかるという欠点もある。IAの詳細については文献7)、8)に譲る。IAの基本的なアルゴリズムは、以下のように示される(図-5参照)。

【Step 1】抗原の認識

抗原をシステムに認識させる。最適化問題において抗原は目的関数と制約条件にあたる。したがって、目的関数および制約条件をシステムに組み込み、それらを制御するパラメータがあれば入力情報として与えることにより抗原を認識させる。

【Step 2】抗体の遺伝子型の決定(コーディング)

対象とする問題の解候補にあたる抗体(GAsでの個体に相当)の遺伝子要素を記号列で表すことにより、対象とする問題にIAを適用することができる。

【Step 3】初期抗体群の生成

Step 2で決められたモデルに基づいて、記号列を乱数を用いて産生する。

【Step 4】終了判定

最終世代数に達するか、あるいは解の探索が十分行われたなら、抗原の排除に成功したものと計算を終了する。

【Step 5】抗体間の親和度の計算

全抗体について他の全ての抗体との親和度(類似性)を測定する。抗体と抗体との親和度 $ay_{i,j}$ は次式より得られる。

$$ay_{i,j} = 1/(1 + H_{i,j}) \quad (8)$$

ここで、 $H_{i,j}$ は抗体 i と抗体 j との距離であり、 $H_{i,j} = 0$ のとき、抗体 i と抗体 j は完全に一致。一般にはハミング距離が用いられる。

【Step 6】 抗原と抗体間の親和度の計算

全抗体について抗原との親和度（解の評価値）を計算する。抗原と抗体間の親和度 ax_i は次式により得られる。

$$ax_i = opt_i \quad (9)$$

ここで、 opt_i は抗原と抗体 i との結合力の強さの評価値である。本研究では、抗原と抗体との結合力の強さの評価値には、コストあるいは品質を用いている。すなわち、コストが小さいもの、または品質が良いものほど抗原と抗体間の親和度（解の評価値） ax_i が大きくなる。本研究での検証（コスト最小化モード）では、式(1)より目的関数 F が総費用の最小化であることから、求めた総費用の逆数を opt_i の値として用いる。

【Step 7】 記憶細胞とサプレッサー細胞への分化

探索過程で得られた有効な抗体を記憶細胞とサプレッサー細胞として産生する。ここで産生される記憶細胞が最適解の候補となる。

まず、全ての抗体の濃度を計算し、抗体の濃度 c_i が閾値 (T_c) を超えた抗体 i を記憶細胞に分化させる。ただし、全ての記憶細胞とその抗体の親和度を計算し、記憶細胞との親和度があらかじめ決めておいた閾値 (T_{ac3}) を越えた場合には、その記憶細胞との入れ換えを行う。また、記憶細胞の数には限りがあり、記憶細胞の総数が上限に達したときは、それまでに保存してきた記憶細胞と分化した記憶細胞との親和度を計算し、その中で最も親和度の高い記憶細胞と入れ換えを行う。ここでは、抗原との親和度が選択した記憶細胞よりも分化した記憶細胞の方が高い場合のみ入れ換えを行う。

次に、新しく分化した記憶細胞と同じ遺伝子型を持つ抗体をサプレッサー細胞に分化させる。ただし、同世代に分化する記憶細胞は1つ以下とし、候補の中で最も抗原との親和度（解の評価値）が大きい抗体とする。抗体 i の濃度 c_i は次式で与えられる。

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^N ac_{i,j}}{N} \quad (0 \leq c_i \leq 1) \quad (10)$$

$$ac_{i,j} = \begin{cases} 1 & ay_{i,j} \geq T_{ac1} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 T_{ac1} は類似度の閾値であり、 N は抗体の総数である。つまり、抗体 i と抗体 j がある程度の類似性 (T_{ac1}) を持っているとき、同一種類の抗体とみなすことを示している。

【Step 8】 抗体産生の促進と抑制

- ① 全抗体の中で抗原との親和度の低いものから $N/2$ 個を自然消滅させる。
- ② ①の操作で生き残った各抗体についてサプレッサー細胞との親和度を計算し、親和度が閾値を超えた抗体を消滅させる。この操作により同じ記憶細胞の産生を回避することができる。
- ③ 抗体の次世代に残る期待値を次式により与える。

$$e_i = \frac{ax_i \prod_{s=1}^S (1 - as_{i,s}^k)}{c_i \sum_{j=1}^{N'} ax_j} \quad (12)$$

$$as_{i,s} = \begin{cases} ay_{i,s} & ay_{i,s} \geq T_{ac2} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 T_{ac2} は類似度の閾値であり、 N' は生き残っている抗体数、 S はサプレッサー細胞の総数、 k は産生抑制力 (Suppress power) である。

式(12)により期待値を与えることで、抗原との親和度が高い抗体ほど次世代に残る確率を高く、そしてサプレッサー細胞との親和度が高く濃度が高い抗体ほど次世代に残る確率を低くする。サプレッサー細胞に反応する抗体の産生を抑制することにより、同種類の記憶細胞の産生を防ぎ、複数の解の探索効率を高める。

【Step 9】 抗体の産生

① Step 8-②で消滅した抗体に代わる抗体を産生する。乱数を用いて各遺伝子をランダムに決定することにより抗体を産生する。②次に Step 8 で残った抗体と新しく産生した抗体に対して、重複を許して $N/4$ 組の抗体のペアを選択する。ここで、確率的に期待値が高い抗体ほど選択されやすいものとする。ペアになった抗体に対して交叉を行い、新しく $N/2$ 個の抗体を産生する。産生した抗体に対して突然変異操作を行い、遺伝子を変化させる。ただし、交叉方法と突然変異確率は任意に設定する。ここで、交

又と突然変異にはGAsで行う交叉と突然変異と同じ操作を用いる。

Step 4からStep 9までを終了判定を満足するまで行う。

解の抗体へのコーディングはSGAにおける遺伝子と同様の方法を用いている。従って、最適化問題の目的関数や制約条件についてもSGAにおけるものと同様である。また、IAに関する各パラメータは表-5に示す値を用いている。

表-5 計算に用いたIAのパラメータ

項目	パラメータの値, 手法
抗体数	30
世代数	300
記憶細胞数	5
サプレッサー細胞数	10
閾値 Tac1	0.6
閾値 Tac2	0.45
閾値 Tac3	0.5

表-6 IAによるメンテナンスプラン最適化の出力結果(期間5年)

計画番号	対策	コスト(U)	品質
1	1年後:断面修復, 樹脂注入 3年後:樹脂注入	61.4	455
2	1年後:断面修復, 樹脂注入 2年後:樹脂注入	61.4	455
3	1年後:断面修復, 樹脂注入 4年後:樹脂注入	61.4	455
4	1年後:モルタル吹き付け, 断面修復, 樹脂注入 5年後:樹脂注入	71.2	449
5	1年後:ガラスクロス, 断面修復, 樹脂注入 5年後:樹脂注入	82.4	455

表-7 IAによるメンテナンスプラン最適化の出力結果(期間6年)

計画番号	対策	コスト(U)	品質
1	1年後:断面修復, 樹脂注入 3年後:樹脂注入	61.4	542
2	1年後:断面修復, 樹脂注入 2年後:樹脂注入	61.4	538
3	1年後:断面修復, 樹脂注入 4年後:樹脂注入	61.4	536
4	1年後:断面修復, 樹脂注入 3年後:モルタル吹き付け, 樹脂注入	71.2	557
5	1年後:モルタル吹き付け, 断面修復, 樹脂注入 3年後:樹脂注入	71.2	564

4.7 IAによる実行結果の検証

表-6から表-9にIAを最適化手法として適用したメンテナンスプラン最適化機能のコスト最小化モード(主桁対象)によって算出した準最適解(記憶細胞に保存されている5個の抗体)について出力結果を示す。また、図-4に多様度の推移を示す。IAではサプレッサー細胞の働きにより解候補との類似度が高い抗体が消滅し、常に新しい抗体を産生することにより多様性が維持できていることがわかる。計算時間(CPU time)は約13secとSGAの場合の3secより4倍近くかかっているものの、表-4の厳密解と比較すると、異なる複数の準最適解が出力されるため厳密解が出力される確率も高く、長期的な計画の作成であっても解は安定することが予想される。また、適応度(コストや品質)が等しい個体でもその維持管理対策の組み合わせは変わってくることから、数種類の準最適解(維持管理計画案の候補)を求めてその中からユーザが自由に選択することができることは、より環境条件や施工

条件に適した計画を選択できることでもあるので現実問題としてもきわめて有効であると言える。

維持管理計画の最適化のため本研究で用いたSGAは、高速に近似最適解を求めることができるが、解の探索範囲が大きくなると解が不安定になり、近似最適解が出力されにくくなることが検証された。そこでIAを適用することにより異なる複数の準最適解を求めることができ、解の安定性が増すことが検証された。

5. まとめ

本研究では、J-BMSの一機能であるメンテナンスプラン最適化機能の最適化手法であるSGAの信頼性を検証するため、SGAによる解と厳密解を比較した。その結果SGAによる最適化では、維持管理計画を行う期間が長くなるほど、最適解を出力する頻度は減っていき、実際の維持管理業務で考慮するような期

表-8 IAによるメンテナンスプラン最適化の出力結果（期間7年）

計画番号	対策	コスト(U)	品質
1	1年後：断面修復，樹脂注入 3年後：樹脂注入	61.4	619
2	1年後：断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入	61.4	611
3	1年後：断面修復，樹脂注入 3年後：モルタル吹き付け，樹脂注入	71.2	644
4	1年後：断面修復，樹脂注入 3年後：モルタル吹き付け，樹脂注入 7年後：ガラスクロス，樹脂注入	116.0	644
5	1年後：断面修復，樹脂注入 3年後：FRP 4枚接着 or 鋼板接着，樹脂注入 7年後：ガラスクロス，樹脂注入	214.5	1098

表-9 IAによるメンテナンスプラン最適化の出力結果（期間8年）

計画番号	対策	コスト(U)	品質
1	1年後：断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入 8年後：樹脂注入	89.2	674
2	1年後：断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入 6年後：樹脂注入	89.2	728
3	1年後：断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入 5年後：樹脂注入	89.2	737
4	1年後：断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入 3年後：樹脂注入	89.2	721
5	1年後：ガラスクロス，断面修復，樹脂注入 2年後：樹脂注入 5年後：樹脂注入 8年後：樹脂注入	113.0	737

間ではその信頼性が低いことが検証できた。そこで、より高い信頼性を確保するため、最適化手法としてIAを適用した。その結果SGAでは最適解を出力することができなかった期間についても最適解を出力することができ、SGAよりも信頼性が高いことが検証できた。またIAでは、複数の維持管理計画案を示すことができ、ユーザーの選択範囲の広い結果を示すことができた。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.10.
- 2) 宮本文穂，串田守可，足立幸郎，松本正人：Bridge Management System(BMS)の開発，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.91-106，1997.3.
- 3) 宮本文穂，河村 圭，中村秀明：Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.191-208，1998.3.
- 4) 河村 圭，宮本文穂，中村秀明，小野正樹：Bridge Management System(BMS)における維持管理対策選定システムの開発，土木学会論文集，

No.658/VI-48，pp.121-139，2000.9

- 5) D. E. Goldberg：Algorithms in Search, Optimization and Machin Learning, Addison-wesley, 1989.
- 6) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993.6.
- 7) 森 一之，築山 誠，福田豊生：免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化，電気学会論文誌，Vol.117-C，No.5，pp.593-598，1997.
- 8) 中村秀明，宮本文穂，松本 剛：改良型免疫アルゴリズムによる多峰性関数の最大値の探索，第6回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-102，1999.12.
- 9) 伊里政夫，今野 浩：数理計画の応用<理論編>，産業図書，pp.210-219，1982.12.
- 10) 大矢雅則：エントロピー・その様々な顔つき，数理科学，No.294，pp.5-13，1987.

(2000年9月14日受付)