

## I-24 既存橋梁の最適補修・補強計画への遺伝的アルゴリズムの適用

*Application of genetic algorithm to optimal repair and strengthening plans for existing bridges*

○小野正樹\*

Masaki Ono

宮本文穂\*\*

Ayaho Miyamoto

中村秀明\*\*\*

Hideaki Nakamura

河村 圭\*\*\*\*

Kei Kawamura

【抄録】 本研究は、従来より著者らが開発してきた「橋梁維持管理支援システム (Bridge Management System : BMS)」の1機能である「メンテナンスプラン最適化機能」において、対象橋梁の経済性と品質の両方を考慮に入れた最適補修・補強計画を、遺伝的アルゴリズムを適用することで策定したものである。また、実際の既存橋梁に本手法を適用し、その妥当性を検証した。

【Abstract】 This paper describes the optimization of repair and strengthening planning which is one of the function in bridge management system (BMS). The authors consider the economical and quality as the optimum indexes and adopt the Genetic Algorithm (GA) as the optimum method. Furthermore, by applying this function to an actual in-service bridge, it have verified that employed method is effective.

【キーワード】 BMS (橋梁維持管理支援システム), 補修, 補強, 遺伝的アルゴリズム,  
多目的最適化, 維持管理計画

【Keywords】 *BMS (Bridge Management System) , Repair, Strengthening, Genetic Algorithm(GA),  
Multiobjective Optimization, Maintenance Planning*

## 1. はじめに

現在我が国に数多く架設されている橋梁には、近年における通行車両の大型化や交通量の増大などの要因により劣化が進行し、何らかの維持管理対策が必要なものが少なくない。しかしながら、橋梁管理機関が維持管理に割り当てることのできる予算には限界があることから、限られた予算を最大限に活かした維持管理計画を作成できるシステムが近年注目されている。

既存橋梁の補修・補強計画の策定には、対象橋梁の劣化程度に応じて経年ごとに考慮される多数の工法とその効果、あるいは施工時期など多くのパラメータが関わっており、数多くの選択肢の中から最適

な維持管理対策を選択する必要があるが、その膨大な組合せ数のため、直列的な解探索法ではその最適化に膨大な時間がかかってしまう。

そこで本研究は、包括的な橋梁管理支援システム (Bridge Management System) の1機能として、主としてコンクリート橋梁を対象とする各橋梁ごとの補修・補強計画を最適化するため、既存橋梁の補修・補強計画を組み合わせ最適化問題としてとらえ、その最適化手法として『遺伝的アルゴリズム (以下GA)』を適用し、その近似最適解を比較的効率良く求めることを試みるとともに、実際の既存コンクリート橋に対して適用してその有効性を検証したものである。

---

\*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 宇部市常盤台 2557)  
 \*\*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 宇部市常盤台 2557)  
 \*\*\*正会員 博士 (工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)  
 \*\*\*\*正会員 修士 (工学) 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒755 宇部市常盤台 2557)

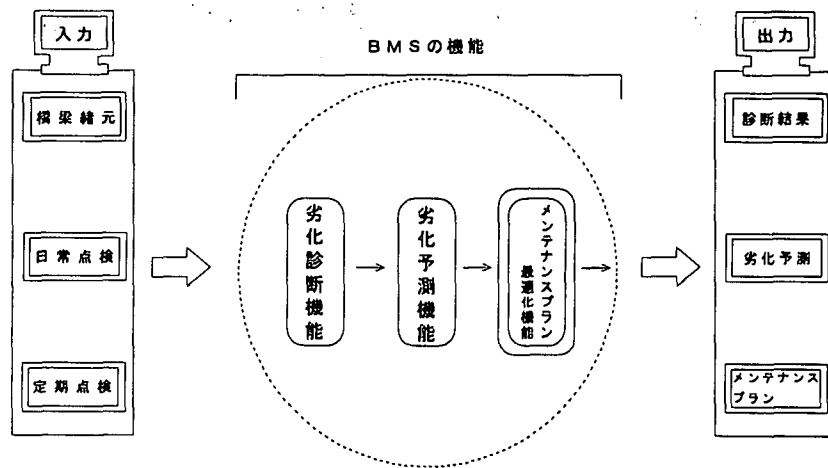


図1 BMSと本システムの関係図

## 2. BMSにおける本最適化システムの位置づけ<sup>1)</sup>

本研究で開発する補修・補強計画の最適化システムは、著者らが従来より開発している Bridge Management System (以下 BMS) の1機能として研究されている。本システムとBMSとの関係は図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。そしてその結果を本システムである「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

本システムを構築するにあたり、橋梁に対する各工法を「補修」と「補強」の категорияに区分して整理した。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いる。この定義をもとに本システムで考慮した橋梁部材である主桁および床版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、補強に区分したものにまとめた。次に、実際に考慮される補修・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後述する表1および表2のように整理し

た。なお、各維持管理対策が対象橋梁の今後の劣化状態に与える影響については参考文献[1]を参照していただきたい。

### 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いえる。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がるが、本システムにおいては耐荷性と耐久性の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。そして品質指標とは、劣化診断機能で診断した時点から予定供用年数までの各年次における耐久性と耐荷性の平均健全度の合計として用いた。

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もっとも効率よく維持管理を行っていただけるか」という組み合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。

	補修・補強計画			
橋齢	t	t+1	t+2	...
対策	④	①	②	...

- ① 補修・補強をしない
  - ② 樹脂注入工法
  - ③ 鋼板接着工法
  - ④ 外ケーブル補強工法
  - ⑤ ...
  - ⑥ ...
- 考慮される維持管理対策

図2 補修・補強計画のモデル化

#### 4. 本システムの概要

##### 4-1. GAの概要<sup>2)</sup>

GA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り、近年組み合わせ最適化問題の解法として注目されている最適化手法である。GAは従来の直列的な解探索法に比べて複数の探索点が相互協力的に解を探索していくので、短時間でよい解を見つけることができ、また現在の適応度がわかれば解の探索が可能であり、アルゴリズムが単純で、不連続な評価関数にも適用できるといったような特徴を持っている。GA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)。

##### ①ステップ1: 遺伝子型の決定(コーディング)

GAでの遺伝子の要素は、DNAではなく記号列である。対象とする問題から記号列へと変換(コーディング)を行う。

##### ②ステップ2: 初期個体集団の発生

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。

##### ③ステップ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。

##### ④ステップ4: 選択(淘汰と増殖)

次のステップで交叉を行う個体の生存分布を決定する。

##### ⑤ステップ5: 交叉

遺伝子を組み替えて、新しい個体を発生させる。

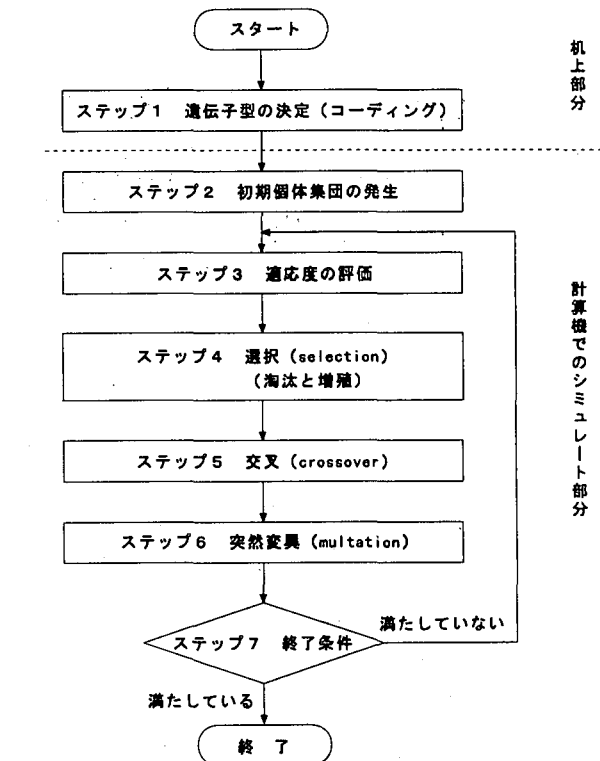


図3 GAの流れ

##### ⑥ステップ6: 突然変異

遺伝子のある部分の値を強制的に変えて、個体集団としての多様性を大きくする。

##### ⑦ステップ7: 終了条件

終了条件(平均適応度, 最大適応度, 世代数等)を評価し, 条件を満足していれば計算を終了し, 満足していなければステップ3に戻り計算を続ける。

##### 4-2. 維持管理対策のコーディング

GA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、対象の問題を個体の形に置き換える(コーディングする)必要がある。本システムでは3-1節に述べたとおり、まず既存橋梁に対する各補修・補強工法を整理し、それらの組み合わせである維持管理対策を整理した。その結果、主桁では10通り、床版では9通りの維持管理対策があり、どちらも2進数で表現しようとするると4 bit 必要となる。このとき、4 bit で表現可能な数は16通りであり、主桁では6通り、床版では7通りの致死遺伝子を持つ個体が発生してしまう。そこで、実際の維持管理計画では他の対策に比べ、「補修・補強をしない」が頻繁に選択されるであろうことを考慮して、余りのコードはすべて「補修・補強をしない」であるとした。また、本研究では、突然変異の手法とし

表1 維持管理対策のコーディング (主桁)

コード	主桁の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
1000	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
1101	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
0010	FRP 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
0100	FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	外ケーブル
0111	外ケーブル+樹脂注入 or 外ケーブル+樹脂注入+断面修復
1001	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
0011	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
others	補修・補強をしない

表2 維持管理対策のコーディング (床版)

コード	床版の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
0010	FRP 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
0100	FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	縦桁増設
1011	縦桁増設+樹脂注入 or 縦桁増設+樹脂注入+断面修復
0111	床版増厚
1001	床版増厚+樹脂注入 or 床版増厚+樹脂注入+断面修復
0011	床版打替え
others	補修・補強をしない

て個体中からランダムに1 bit 選択し、その値を反転する方法を用いているため、ある維持管理対策が突然変異後に変わりうる対策はハミング距離が1である4つだけなので、コードと各対策との対応づけにも気をつけねばならない。以上のことから主桁、床版それぞれの維持管理対策を表1および表2のように4 bit のコードに対応づけた。

また、維持管理の対象となる期間は現時点から予定供用年数までで、対策の有無は毎年考慮するので、1つの補修・補強計画は維持管理対策を列で表し、それを並べた補修・補強計画を行で表現した2次元配列状の個体として構成した。補修・補強計画のコーディング例を図4に示す。

4-3. 最適化のアルゴリズム

本研究で考慮した最適化指標は3-2節で述べたとおり経済性と品質指標の2つであるが、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

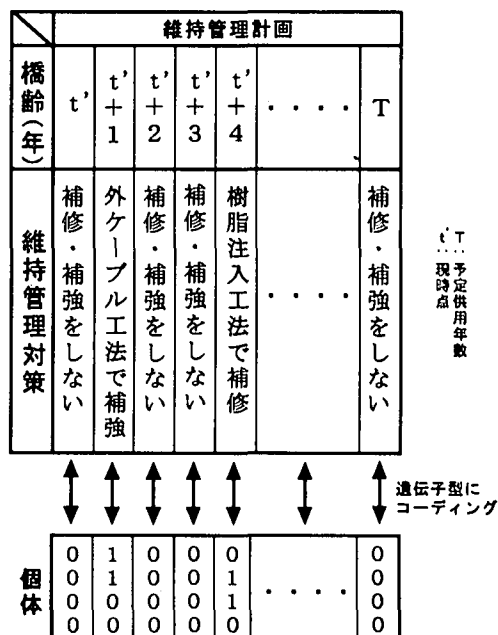


図4 補修・補強計画のコーディング例

一制限法<sup>3)</sup>」を組合せて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 Step 1 : まず経済性 (コスト) 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。

目的関数 : 
$$F = \sum_{t=t'}^{T-1} C_{tj} \rightarrow Min \quad (1)$$

制約条件 :  $f(t) > 0$   
 $g(t) > 0$   
 $0 < t < T$

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  
 $C_{tj}$  : 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、4-2節に示すとおり主桁の場合では10通り、床版では9通りの対策を考慮している。Step1 で求めた補修・補強計画に必要な費用を  $cost1$  として記憶しておく。

② Step 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  $cost1$  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  $\alpha$  を決め、 $cost1$  と  $\alpha$  の合計をトータルコストの上限  $\epsilon$  として定める。Step2 での目的関数は、

目的関数 : 
$$F = \sum_{t=t'}^T \{f(t) + g(t)\} \rightarrow Max \quad (2)$$

制約条件 : 
$$\sum_{t=t'}^{T-1} C_{tj} \leq \epsilon$$
  
 $f(t) > 0$   
 $g(t) > 0$   
 $0 < t \leq T$

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)

表3 実際に用いたGA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
突然変異確率	10%
選択手法	トーナメント方式+エリート保存方式
交差手法 (交差率)	1点交差 (100%)
終了条件	世代交代数が世代数に達したら終了

$T$  : 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  
 $C_{tj}$  : 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

と表すことができる。なお、維持管理対策  $j$  の種類は先に述べたものと同じである。

③ Step 3 : Step 2 の上乗せ予算額  $\alpha$  を変化させて Step 2 を繰り返すことで、橋梁管理者と対話的に様々な補修・補強計画を提示する。

GAの手法には様々なアルゴリズムが提案されているが、本システムは今後単体橋梁だけでなく、橋梁網全体系でのメンテナンスプランの最適化を行うことを考えており、GAの機構を複雑化すると今後の機能拡張が困難になると考えられるため、単純GAを採用した。実際に計算に用いたGAの各パラメータは上記の表3のものを用いた。これらのパラメータは幾度かの試行錯誤により決定したものである。なお、世代数による終了条件では、真の最適解に近づく保証はないが、本システムでは上述した最適化のアルゴリズムで補修・補強計画の策定を数回繰り返し、その内の最良解を採用することで満足な解を得ている。

以上のことから、本システム全体の流れは図5のように示される。

### 5. 実橋への適用

本システムの妥当性を検証するため、山口県内に実際に架設されている橋梁に対する補修・補強計画の最適化を行った。本システムへの入力データは、

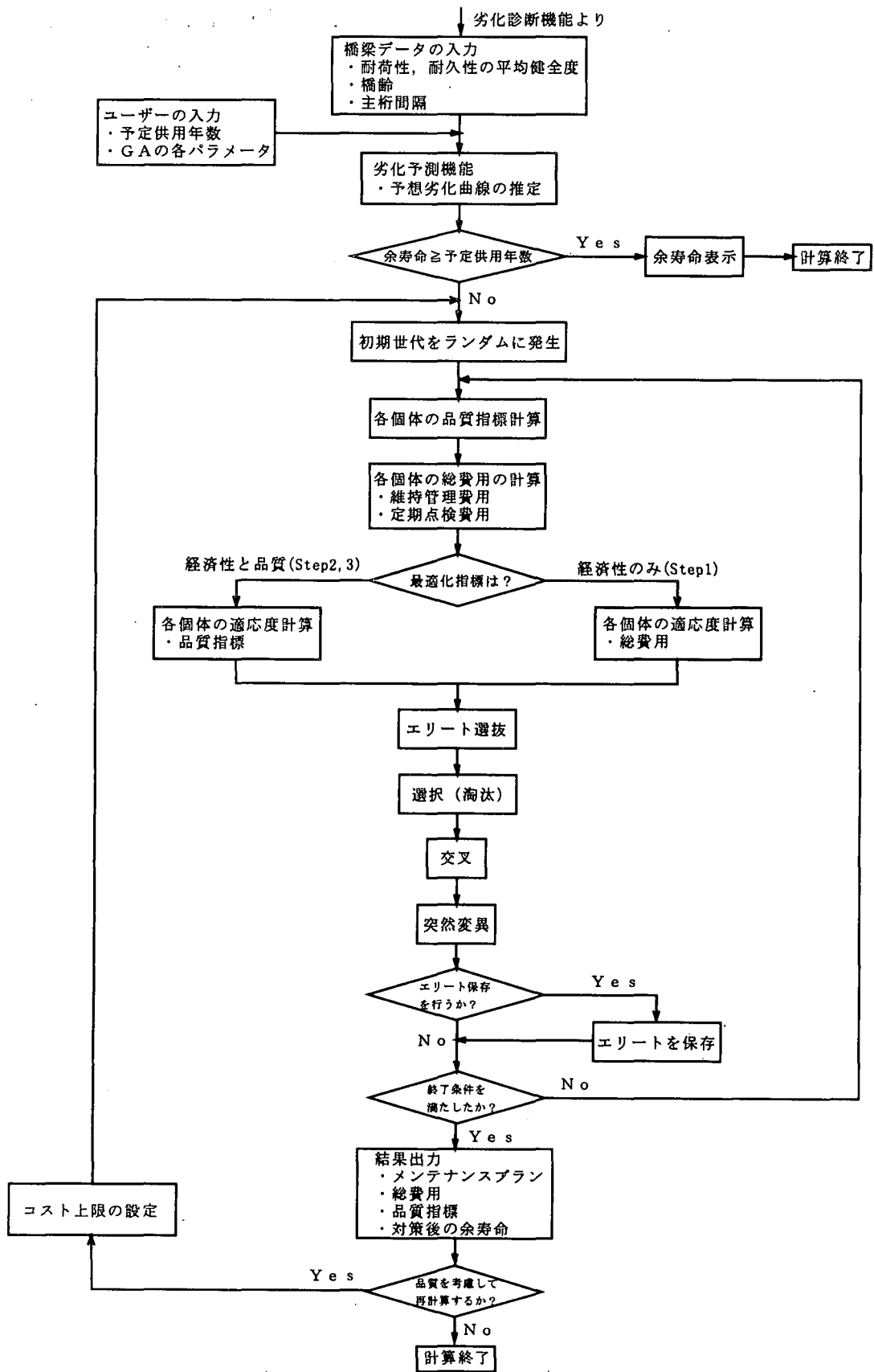


図5 本システム全体の流れ

表4 実際の入力データ

項目	入力データ
橋梁名	Y橋
主桁耐久性	39.0
主桁耐荷性	62.1
床版耐久性	48.4
床版耐荷性	59.6
主桁間隔(m)	1.57

山口県内に架設されている「Y橋」を対象橋梁として、専門家による点検を行い、その点検データをエキスパートシステムを用いて劣化診断させたものである。実際に本システムに入力した値を表4に示す。ここで表中の主桁耐久性～床版耐荷性に割り当てた入力値はもともと健全な状態を100、維持管理の限界と見なせる状態を0とするそれぞれの部材の健全度を表す指標である<sup>4)</sup>。なお、予定供用年数は100年として設定した。

本システムによる最適化の結果として、図6にStep 1として主桁に対して費用の最小化を目的として最適化を行った結果を示し、図7に上乗せ予算額 $\alpha$ を75U（ここで費用の単位U(Unit)は、1U=¥1,000/m<sup>2</sup>と概略換算）として主桁耐荷性および主桁耐久性を考慮した品質の最大化を目的とした最適化を行った出力結果をそれぞれ示す。同様に床版においても主桁の場合と同様の最適化を行った。その結果の出力画面を図8および図9に示す。これらの結果は、本システムによる補修・補強計画の策定を数度行った内で代表的なものである。これらの出力画面は本システムの最終出力画面であり、上部には耐荷性と耐久性の予想劣化曲線をグラフにしたものが表示され、下部には策定したメンテナンプラン、必要なコスト、余寿命などの各結果が示される。また、GAの最適化手法としての妥当性の検証のため、比較手法として分枝限定法<sup>5)</sup>を用いた最適化を行った。その結果を表5に示す。

図6より、本システムにより策定された費用最小化を目的とした補修・補強計画は、橋齢62, 67, 76年にそれぞれ異なる補修を3回実行することが最適と出力され、これにより耐荷性・耐久性から見た余寿命が48年に延び、予定供用年数を満足させることが

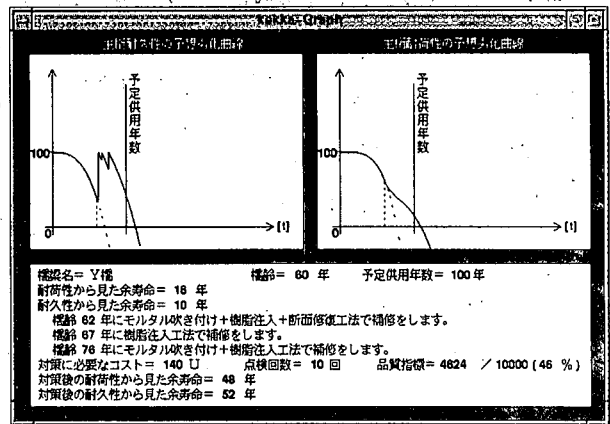


図6 費用最小化の結果（主桁）

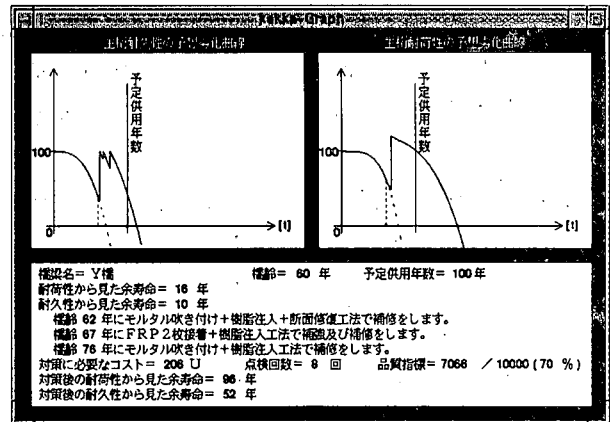


図7 品質最大化の結果（主桁,  $\alpha=75U$ ）

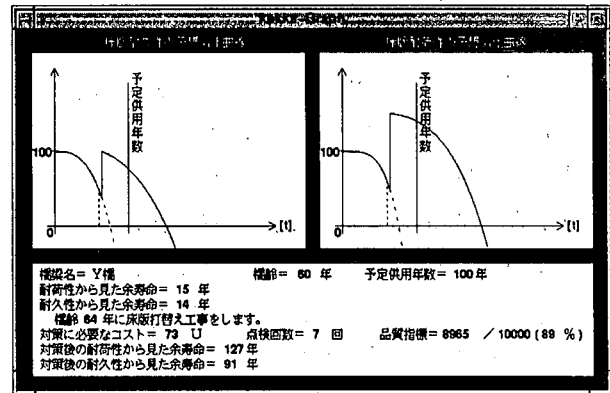


図8 費用最小化の結果（床版）

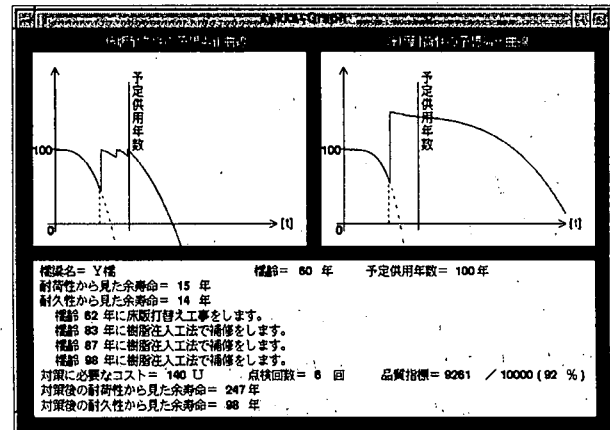


図9 品質最大化の結果（床版,  $\alpha=75U$ ）

表5 分枝限定法による最適化（主桁，費用最小化）

橋齢	維持管理対策	費用(U)
65	ガラスクロス+樹脂注入+断面修復	91.0 U
70	ガラスクロス+樹脂注入	
75	樹脂注入	

可能であることが分かる。また、図7より上述の結果にさらに75Uの費用の上乗せを考慮することにより、維持管理対策として補強が選ばれ、耐荷性の向上により品質指標が46%から70%に向上していることが分かる。さらに、図8より床版に対するメンテナンスプランとして、床版打替え工法が選択されているが、これは他の工法に比べて費用が安くかつ効果が大きいためである。しかし実際の現場ではこの工法はほとんど行われていない。これは、今回の計算では交通規制による損失を考慮していないためにこのような結果になったものと考えられる。また、図9より、同じ75Uの費用を上乗せしたにもかかわらず主桁の場合と違い品質指標は89%から92%になり、品質はあまり向上しなかったことがわかる。これは、図8において採用された床版打替え工法が十分に品質を向上させているためと考えられる。

比較手法との出力結果である図6と表5を比べると、両手法により出力された補修・補強計画はともに補修を3回行う結果となっており、費用の面で、分枝限定法では1回の点検に必要な費用4.0Uを考えていないことを考慮すると、その出力結果はほぼ一致しているといえる。また、計算速度の面ではGAによる解の探索時間は数分～十数分程度であったのに対して、分枝限定法で行ったものはあまりに膨大な時間がかかるために目的関数の簡略化をしなければならぬほどであったことを考えると、GAによる最適化は妥当であると思われる。

## 6. まとめ

本研究で得られた主な成果をまとめると以下のようになる。

①既存橋梁の補修・補強計画の最適化を組合せ最適化問題としてとらえ、その最適化手法にGAを用いることで、高速にその近似最適解を求めることを可能にした。

②既存橋梁の補修・補強計画の最適化において、経済性（コスト）のみならず耐荷性および耐久性を考慮した品質も考慮に入れた計画の策定を対話的にを行い、様々な補修・補強計画を提示することを可能にした。

③最適化問題の解法としてのGAは高い実用性を見せた。また、今後本BMSの機能を拡張する際における最適化問題への適用に十分な期待がもてた。

④実際に山口県内の既存橋梁に対して本システムを適用し、その妥当性を検証した。

最後に、本システムのこれからの課題と展望を列挙する。

- ・維持管理対策として新橋および橋梁の架替えを考慮に入れた、Life Cycle Costを考慮した最適補修・補強計画の策定。

- ・より高速で安定した解を策定するための、GAの各パラメータの検証。また、他の最適化手法との比較、検討。

- ・維持管理の対象となる橋梁全てをネットワークとしてとらえた、橋梁網（ネットワーク）レベルでの維持管理計画の支援を行うことのできるシステムの開発。

謝辞：本研究のまとめにあたり、種々のご援助を頂いた山口大学大学院生 山岡健一氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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 No560/VI-34, pp91-106, 1997.3
- 2) 萩原将人: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1994)
- 3) 伊藤正夫, 今野浩: 数理計画の応用<理論編>, 産業図書, 1982
- 4) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集 No510/VI-26, pp91-101, 1995.3
- 5) 浅野孝夫, 今井浩: 計算とアルゴリズム - 計算機の化学 -, オーム社, pp56-61, 1986