構造工学論文集　Vol. 51A（2005年3月）　　土木学会

多目的遺伝的アルゴリズムを用いたライフサイクルコスト分析

Life-cycle cost analysis using multi-objective genetic algorithm

古田均*，亀田学広**，中原耕一郎***，
Hitoshi Furuta, Takahiro Kameda, Koichiro Nakahara

*工博 関西大学教授 総合情報学部（〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1）
**関西大学大学院 総合情報学研究科（〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1）
***鹿島建設㈱ 土木設計本部 設計技術部（〒107-8502 港区赤坂 6-5-30）

In this paper, an attempt is made to develop a life-cycle cost analysis by introducing the concept of multi-objective optimization. Using a multi-objective genetic algorithm (NSGA2), it is possible to examine the effects of environmental conditions surrounding bridges on the optimal maintenance planning. Through several numerical examples, it is obtained that the optimal maintenance plans, especially repair methods, are quite different between the short term maintenance plan and the long term maintenance plan. Then, it is confirmed that the effects of environmental conditions on the optimal decision of bridge maintenance are very large, and therefore it is necessary to pay attention to the difference of environmental condition such as neutralization and chloride attacks.

Key Words: Multi-objective optimization, Genetic Algorithm, NSGA2, LCC, Cost effective
キーワード：多目的最適化，遺伝的アルゴリズム，NSGA II，維持管理費用，費用対効果

1. はじめに

近年，さまざまな分野で維持管理への関心が高まっている．現在，構造物の利用者の利便性，建設費用などを考慮すると，新たに構造物を建て直すより，現状の構造物の安全性を考慮し，延命を行うことが重要である．維持管理計画を費用最小化の最適化問題と定義し，最適な維持管理計画を策定するには，必要性能，供用年数など様々な条件を事前に決定する必要がある．

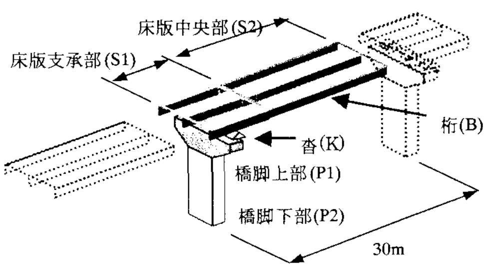
意思決定においては，例えば，維持管理費用と性能の関係を理解した上で，費用対効果の観点から，費用，性能を決定することが望ましい．信頼性工学で重要な考え方の一つでもある．しかしながら，実際に維持管理計画を熟慮し，維持管理計画を策定して，はじめて費用，性能や補修内容が明らかになる．費用と性能の関係を知るためには，最適化条件である性能，供用年数を少しずつ変化させ，多数の計画案を得たうえで，それらを比較しなくてはいけない．これには非常に多くの時間と人手がかかる．

そこで本研究では，最適化された解における費用，性能，供用年数の関係を明らかにするための分析を多目的最適化問題[1]ととらえ，多目的遺伝的アルゴリズム[2]を適用する．本研究では6部材から構成される橋梁を例に，中性化，塩害弱，塩害中，塩害強，それぞれの環境下で性能，費用，供用年数の関係が大きく変わる事を示す．

2. コンクリート橋梁の維持管理計画の最適化

2.1. 対象橋梁のモデル

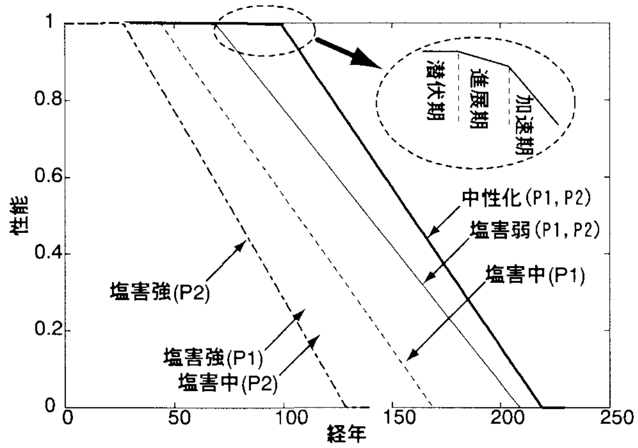
本研究でモデルとしたコンクリート橋梁群[3]は，海岸付近を通る高架の道路橋を想定している．このうち，本研究の対象となるのは，最も劣化の激しい橋脚及び床版(鋼製桁とRC床版の合成構造)からなる6部材，1橋梁である．高架橋は，6つの構造部材(橋脚上部，橋脚下部，沓，桁，床版支承部，床版中央部)から構成される(図－1).



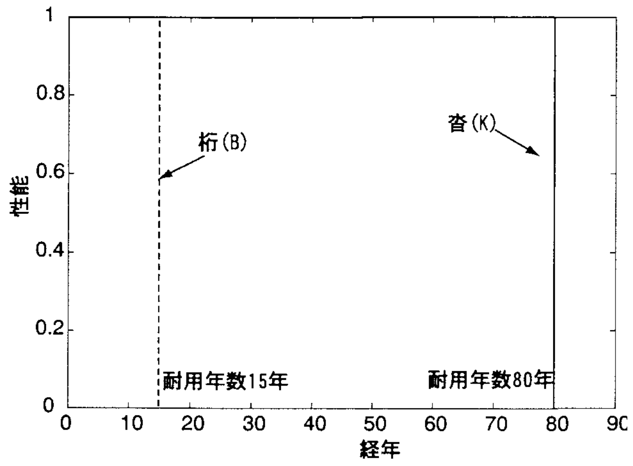
図－1．橋脚の構造

コンクリート構造物の性能が低下する要因としては，構造物を取り巻く環境条件，気象条件，外力条件など外的要

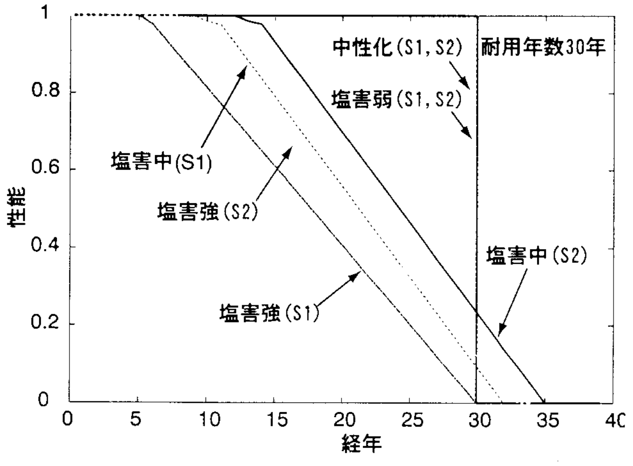
因のほか，設計条件及び施工条件による内的要因がある．また，主な劣化機構としては，中性化，塩害，凍害，化学的侵食，アルカリ骨材反応などの環境作用が原因のものと，疲労や過大荷重などの主に荷重条件が原因のものに大別される．本研究では，劣化要因を中性化，塩害弱，塩害中，塩害強の4つに大別する．塩害強環境下における部材の性能劣化の差を図−2，3，4に示す[3]．また表−1，2に各補修の効果を示す．



図−2．橋脚の性能劣化



図−3．桁，沓の性能劣化



図−4．床版の性能劣化

本研究では，部材の性能を，健全時に有している性能に対する割合として健全性で表す[4]．部材の性能低下は，考慮する部材により劣化機構が異なるため，各構造部材(橋脚上部及び下部，沓，桁，床版支承部及び中央部)に区分して設定した．

橋脚の性能低下は環境作用の影響が主要因と考え，鉄筋残存率で表した．鉄筋腐食の過程はコンクリート標準示方書[5]に基づき，潜伏期，進展期，加速期を経て腐食するモデルを用いた．

沓の性能低下，桁の性能低下は環境条件によらずそれぞれ，ゴム支承の耐用年数，塗装の耐用年数で表した[3]．耐用年数によって性能を規定することから，図−3に示すように耐用年数までは1，耐用年数後は，0と定義した．これは，コンピュータ計算において，性能劣化モデルと耐用年数モデルを同等に扱いやすくなる．

床版の性能低下は環境作用と繰り返し荷重の両方の影響によると考え，鉄筋残存率及び疲労に対する耐用年数を比較し，中性化，塩害弱環境では劣化よりも疲労に対する耐用年数が短いことから耐用年数で性能を定義し，塩害中，強環境下では疲労より劣化が速いため補修を行うモデルとした．

表−1．橋脚，床版の補修工法と効果

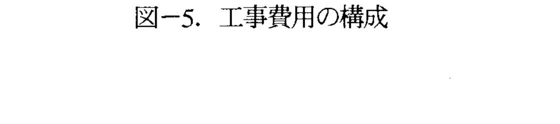
部材	対策工法	平均的な効果の内容
橋脚 床版	表面塗装	性能低下を7年間抑止
	表面被覆	性能低下を10年間抑止
	断面修復 (鉄筋補強)	性能指数を100%まで回復．その後は初期の劣化曲線に従って劣化する
	脱塩 (再アルカリ化)	現状の性能指数から初期の劣化曲線に従って劣化する
	電気防食	性能低下を40年間抑止
	断面修復 及び表面被覆	性能指数を100%まで回復させ，性能低下を10年間抑止． その後は，初期の劣化曲線に従って劣化する

表−2．桁，沓，床版の補修工法と効果

部位	対策工法	平均的な効果の内容
桁	鋼桁塗装	初期性能を耐用年数だけ維持
沓	支承取替	初期性能を耐用年数だけ維持
床版	打替	初期性能を耐用年数だけ維持

2.2 維持管理費用

供用年数の維持管理費用は，工事価格は直接工事費の値によって様々な諸経費が加算されたものとなる．すなわち工事価格は直接工事費+諸経費となる（図−5）．直接工事費は，各部材の面積に補修工法の応じた費用をかけ，さらに必要な足場の費用を加えたものである．

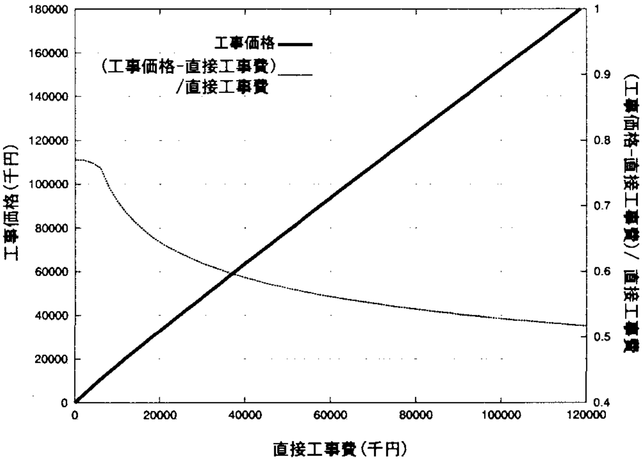


図−5．工事費用の構成

足場費用は，他の部材と共有可能である．共用可能な組み合わせを表−3 に示す．基本的にある部材を補修するために必要な足場は，その部材の下方にある部材の足場を含む．

表−3. 足場費用共用ルール

補修対象部材	足場を共用できる部材
橋脚上部	橋脚下部
橋脚下部	なし
沓	橋脚上部・下部
桁	全ての部材
床版支承部	橋脚上部・下部，沓
床版中央部	なし



図−6. 工事費用の増大と間接費用率の減少

表−4 補修・補強費用

	P1	P2	K	B	S1	S2
表面塗装	780	1,920	−	−	1,640	3,280
表面被覆	2,730	6,720	−	−	4,100	8,200
断面修復	20,670	50,880	−	−	22,140	44,280
脱塩，再アルカリ化	3,510	8,640	−	−	7,380	14,760
電気防食	3,900	9,600	−	−	8,200	16,400
断面修復＋表面被覆	22,620	55,680	−	−	26,240	52,480
更新	--	--	4,200	5,400	--	--

表−5 足場費用

橋脚上部	橋脚下部	沓	桁	床版支承部	床版中央部
360	190	360	4,830	690	510

また，間接工事費，一般管理費等は，国土交通省土木工事積算基準[6]に基づき算出した結果，工事原価にかかる諸経費は工事原価が大きくなるにつれ，割引率が高くなり安価になる（図−6）．同時に工事を行うことでコスト削減が期待できる．しかしながら，補修・補強の間隔が短いものに合わせ，まだ使用できる部材をも交換を行うと無駄が生じ，コストが上がる．

補修計画を最適化するには，先に示した各部材の性能劣化と補修工法の効果および，費用（千円）（表−4，表−5）を参考になるべく無駄がでないように足場費用の削減を促し，同時工事による諸経費の削減を行う必要がある．部材群の補修工法と補修年度は無数の組み合わせが存在し，組み合わせ最適化問題と考えられる．

3. 多目的最適化による維持管理計画策定

3.1 多目的最適化問題

多目的最適化問題とは，評価項目が複数個あり，これらを一つの目的関数にまとめることができない問題のことである．多目的最適化問題は，一般に次のように定義される．

定義（多目的最適化問題）： F を R^n 閉集合

$$F \underline{\Delta} \{x \mid g_i(x) \le 0; i = 1,\cdots,m\} \quad (1)$$

とするとき，$x(x \in F)$ の範囲で，

$$\min\ f(x) = (f_1(x),\cdots,f_k(x)) \quad (x \in R^n) \quad (2)$$

とせよ．

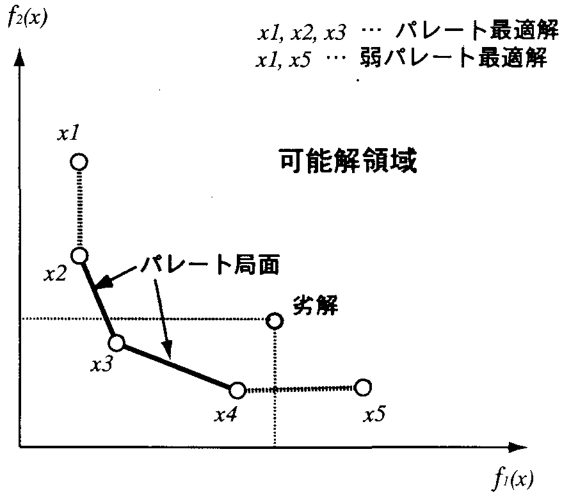
一般に各目的関数は同時に最小（あるいは最大）にすることはできず，これらの間にトレードオフ関数があることが問題の本質である．そこでトレードオフをバランスさせる為に「パレート最適性」の概念が重要になってくる．

パレート最適性を満足させるパレート最適解は次のように定義される．

1) $x^* \in X$ に対して，$f(x) < f(x^*)$（すなわち $f(x) \leqq f(x^*)$ かつ $f(x) \ne f(x^*)$）となる $x \in X$ が存在しないとき x^* をパレート最適解という．
2) $x^* \in X$ に対して，$f(x) \le f(x^*)$ となる $x \in X$ が存在しないとき，x^* を弱パレート最適解という．
3) すべての $x^* \in X$ に対して，$f(x) \leqq f(x^*)$ となる $x \in X$ が存在するとき，x^* を完全最適解という．

一般に，複数の目的関数を同時に最適化する完全最適解は，目的関数が相競合する場合には存在しない．多目的最適化問題では，消極的な解として，目的関数のうちいずれか 1 つを犠牲にすることなしには，他のものを改善することができないような解，パレート最適解を得ることが目的となる．パレート最適解は，他よりも劣っていない解と言う意味で，非劣解とも呼ばれている(図−7)．同図で劣解はすべての目的関数値において優越される解(枠内)が存在するため，この解の存在意義はない．逆にパレート局面の解は，すべての目的関数値を優越する解が存在せず，このよ

うな解が複数あるため，唯一の解を決定できずパレート最適解集合となる[7].



図−7. 2目的関数のパレート最適解概念図

パレート最適解は複数個存在し，これを集合として求めることが，効率的かつ適切に多目的意思決定を行う上で重要となる．意思決定は最終的には決定者（人間）の選好によるため，選好に関する情報をなるべくスムーズに引き出し，また決定過程における矛盾をなくして合理性を与えるのが多目的最適化の役割となる．ただし，問題が大きく組み合わせ問題などのNP困難な性質を持つ場合，様々な解を探索した上で，パレート最適集合を求め，これに対して意思決定を行う必要がある．

3.2 多目的遺伝的アルゴリズム

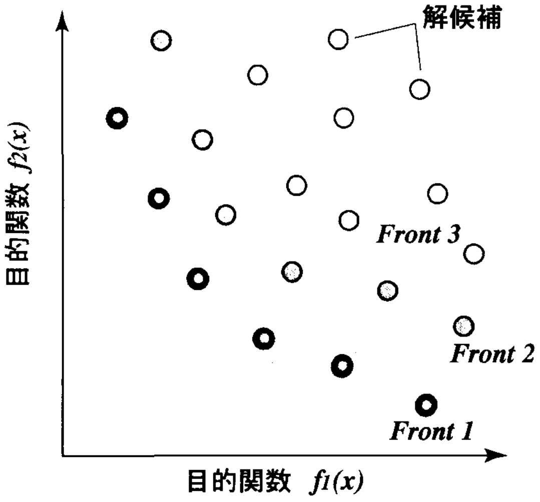
遺伝的アルゴリズム(以下GA：Genetic Algorithm)とは，生物の進化に着想を得た確率的探索手法の一つである．問題の解候補を個体としてGA空間に写像し交叉，突然変異，自然選択といった遺伝的オペレーターを行う．

1） 初期世代発生
2） 親の決定
3） 交叉・突然変異
4） 自然選択

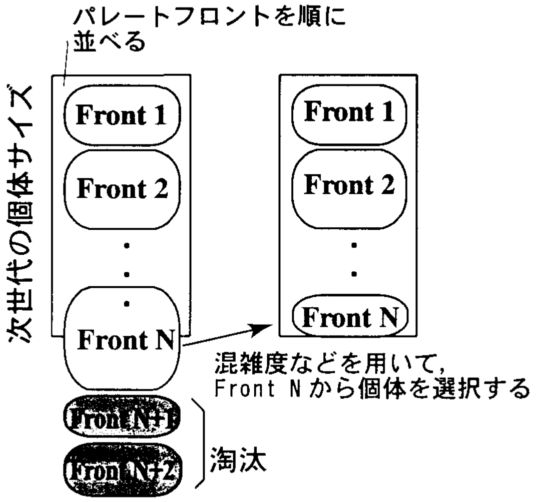
2）から4）を条件が満たされるまで，あるいは指定回繰り返す．各個体は環境に対する適応度を持つ．環境とは問題空間を表す．各個体は，染色体すなわちDNAとしての側面である遺伝子型(Gene Type：GTYPE)と解候補としての側面である表現型(Phenomenon Type：PTYPE)を持つ．各個体は，解候補の側面であるPTYPEによって，目的関数の評価値を与えられ，これにより次世代に遺伝子を伝える確率，生き残る確率が左右される．よりよい評価値を得たものが次世代に遺伝子を伝えることで，よりよい個体，よりよい解候補を生み出すことが可能となる．また，交叉，突然変異における新たな個体の生成は，GTYPEに対して行われる．これにより，無作為な解の多様性を簡単に維持し，有用な解の近傍探索を可能としている．

多目的遺伝的アルゴリズムとは，自然選択(淘汰)の仕組みを改良し，多目的最適化問題に応用したアルゴリズムである．現在，多目的遺伝的アルゴリズムについて，活発に研究がなされており[8]，多くの手法が開発されている．本研究では，その中でもアルゴリズムが簡易で，効率的であるNSGA2[9]を用いる．

NSGA2とはNon dominated Sorting GA(NSGA)の改良型である．Non dominated Sorting (非優越ソート)では，最初に現在個体の中でパレート最適解（非優越解）をFront 1とする．つぎにFront 1を除いた解候補の中で，パレート最適解になるものをFront 2とし，解がなくなるまでFrontを作り出す(図−8)．非優越ソートは，解候補の増大に従い，指数関数的に計算時間が増える．NSGA2では，各解候補が優越する解，その解候補を優越する解のリストを効率よく操作し，ソーティング時間を短縮している．基本コンセプトはNSGAと同じである．



図−8. Non-dominated Sorting



図−9. ソーティング後の選択方法

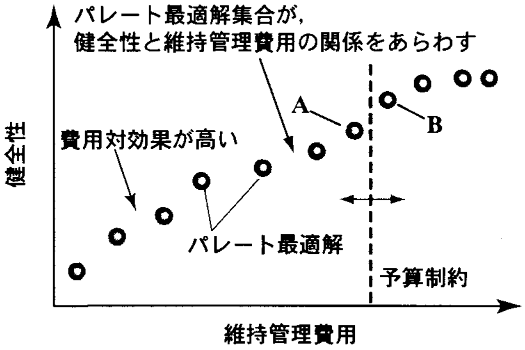
得られたFrontを順に次世代プールに格納する．プールが満杯になった時点のFront内の個体は，混雑度によって，どの解候補を残すかが決められる．混雑度とは，解空間上

における隣接する個体間の距離を意味する. NSGA2 では, 隣接する個体は, 各 Front 内の個体群をいずれかの目的関数でソートし, その順序によって定義する. すなわち, 順序 i の隣接する個体は, i-1, i+1 となる. 個体ごとに隣接する個体との距離を計算し, その和が小さいものほど, 混雑していると定義する. 本研究では個体間の距離を, 補修計画を 2 進数に変換し, そのハミング距離とした.

3.2 多目的最適化と維持管理

最適化とは「限られた条件, 範囲の中で最善を尽くす行為」である. 最適化には「最善」を決定する評価関数と「問題の範囲, 条件」を定義する必要がある. しかしながら制約条件を明確に定義できない場合がある. 例えば維持管理策定で, 決められた予算内で性能を最大にする最適化問題と定義した場合, 図－10 の A の解を選ぶ事になる. なぜなら, 解の存在する位置は未知であり, 最適化アルゴリズムによって得られるかは, 条件内の最大評価値を持つ唯一の解だけである.

しかしながら, 多くの場合, 予算は変更可能であり, 費用対効果の観点から B の解を選ぶ可能性もある. 多目的最適化によってパレート最適解を比較検討する事は, 費用対効果を考慮する事につながる. また近年の社会情勢から, 変更した場合に説明責任が発生する. そのような場合でも分かりやすく合理的な意思決定プロセスの説明が可能になる.



図－10. 多目的最適化による意思決定

本研究では計画を最適化するための前提条件である管理費用, 健全性, 耐用年数を目的関数と定義する. 本システムでは健全性を供用年数中の性能の平均と定義する. すなわち, 維持管理費用を最小に, 健全性を最大に, 耐用年数を最大にすることを目的とし, 多目的最適化問題として解の探索を行う. ここで各目的関数間には, トレードオフ関係が存在する. 例えば, 耐用年数を伸ばすことは維持管理費用を増大させることにつながる. また, 維持管理費用を最小にすることは健全性, 耐用年数を小さくすることにつながってしまう. 多目的最適化を行った維持管理計画は, 各目的関数値を改善するには他の目的関数値を低下させてしまう限界点の解, すなわち複数のパレート解を求めることになる.

本研究では中性化, 塩害弱, 塩害中, 塩害強, それぞれの環境下で性能, 費用, 供用年数の関係を知るために多目的最適化によってパレート解集合を列挙し分析を行う.

従来の分析方法は, いくつかのサンプルをとり, 各目的関数間の関係を式に表し, プロットする事だけをコンピュータに行わせるものである. しかしながら, 近年のめざましい計算資源の発達と, アルゴリズムの発達により, 簡単かつ現実に即した分析, 意思決定の可能性がある.

本研究では, 多目的遺伝的アルゴリズムによって, 優劣が付けられない実行解を, コンピュータを援用する事で数多く求め, これらからグラフを作り出し分析手段を提案する.

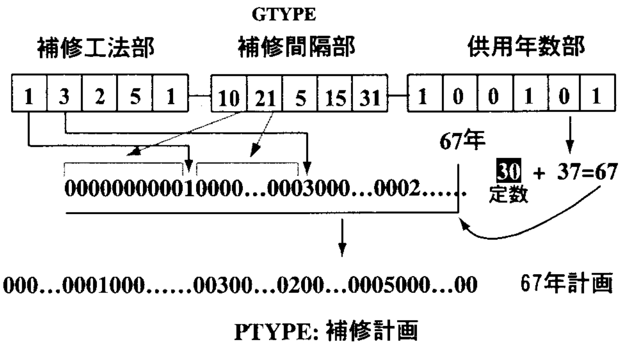
4. システムの構築と適用

4. 1. GA の構成

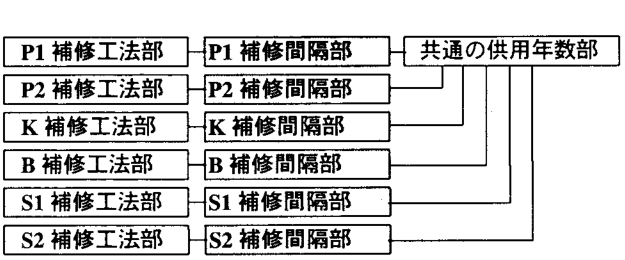
本システムでは, 遺伝子を図－11(1 部材の場合)に示すように構成する. 各個体が持つ DNA を補修工法部, 補修間隔部, 供用年数部に分ける. 本研究では, 6 部材を対象とするため, 補修工法部, 補修間隔部の組が 6 組と共通の供用年数部が 1 組とする遺伝子構造になる(図－12).

補修工法部と補修間隔部は同じ長さをとり, 間隔部の合計が考慮する供用年数に十分な期間を表せる長さとする. 補修工法部の遺伝子情報は, 補修の識別番号が入り, 補修間隔部には次の補修までの何もしない年数が入る.

図－11 において, 遺伝子から補修計画を作る際, まず補修間隔部の先頭の遺伝子を参照し(例では 10), 何もしないを表す補修番号 0 を 10 個並べる. 次に補修工法部の先頭の遺伝子を参照し(例では 1)を付け足す. ここまでで, 11 年間の計画ができあがる. 次に補修間隔部の遺伝子が表す 21 個の 0 を先の"1"に続け, 同様に補修工法部, 補修間隔部の情報を使い計画を作り出す. 以上の工程を



図－11. コーディングルール(1 部材の場合)



図－12. DNA の構造

本システムでは補修・補強を行う部材の識別番号 1 を表面塗装, 2 を表面被覆, 3 を断面修復, 4 を再アルカリ化

および電気防食，5 を断面修復+表面被覆とした．これらの情報を用い，補修計画を作り出す．

供用年数部は6bit の 2 進数値を持ち，これを 10 進数値に戻したものに定数(本システムでは30)を足して，供用年数とする．本システムでは最短で30 年，最長で 94 年の維持管理計画を策定できる．借りに 15 年計画から考慮したい場合，定数を 15 に設定すればよい．

健全性は図−2 で示したように 0 から 1 の範囲で表されるため，全 6 部材では 0 から 6 の範囲の数値をとる．そこで全部材の平均をとり，0 から 1 の値を用いる．

本研究では目的関数を以下に示すように 3 目的における多目的最適化問題として定義した．

1） 工事費用

2.2 で示した定義に従い，耐用年数までの補修工事をすべて足したものとする．最小化を目的とする．

2） 健全性

健全性を性能維持と定義する．健全性は毎年の性能を積分したものを耐用年数で割った年度の平均健全性を向上させることを目的とする．

3） 耐用年数

耐用年数は遺伝子によって決定されたものとする．最大化を目的とする．

表−6 に NSGA2 の実行パラメータを示す．

表−6. GA 実行のパラメータ

個体数	交叉率	突然変異率	世代数
1000	0.6	0.01	1000

4. 2. 多目的最適化の実行結果

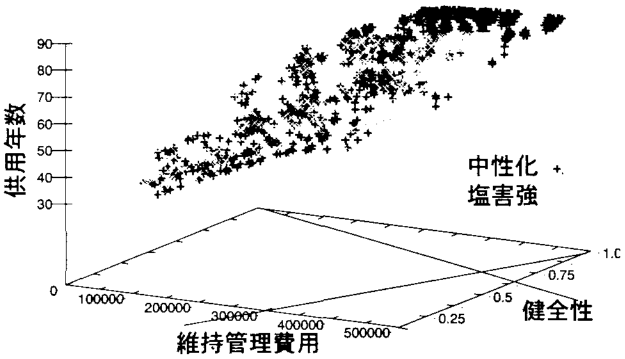
本研究では各環境において，多目的最適化を行いその結果から，環境の違う橋梁に同じ維持管理費用を割り当てる事や，同じ性能を求める事，あるいは簡単な比率で予算の割り当てをする事が合理的でないことを示す．

図−13，14 は中性化環境と塩害環境強の結果を示している．同じ結果を違う視点で表示したものである．図から分かるように解の分布が全く違っている．非常に凹凸も多い．維持管理計画は，補修の有無によって大幅に費用が変わるためである．

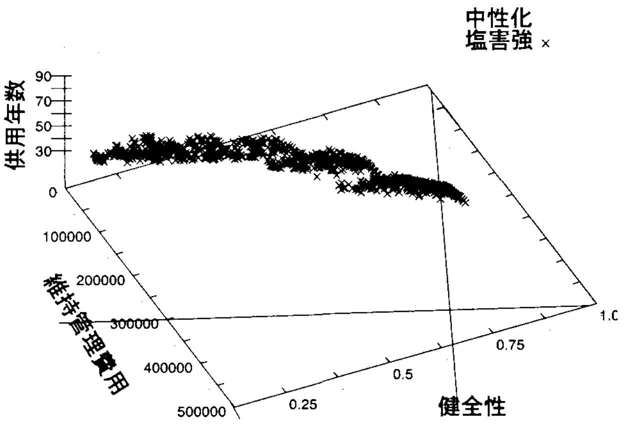
図−15，16 は，x 軸を維持管理費用，y 軸を健全性に設定しプロットしたものである．維持管理費用の単位は千円である．図−15 は中性化と塩害弱環境で実行した解の比較である．同様に図−16 は，塩害中と塩害強を比較したものである．

図−15 に注目すると，中性化，塩害弱ともに，解の分布が大きく 3 つに分かれている．分布の形状は似ているが，分布位置が異なっている．それぞれ費用対効果の分岐点は，100000 千円，200000 千円，28000 千円付近である．この分岐点を過ぎた予算を提供しても，性能を向上させる効果は薄れる事が分かる．意思決定者はこれら費用対効果を考慮し，費用を調節できる．

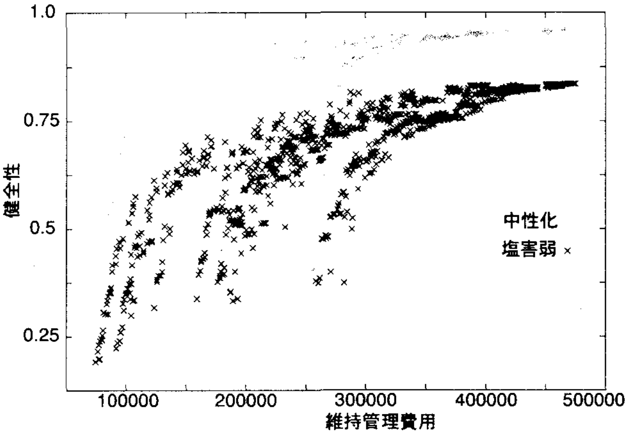
中性化と塩害弱を比べた場合，費用と健全性のトレード



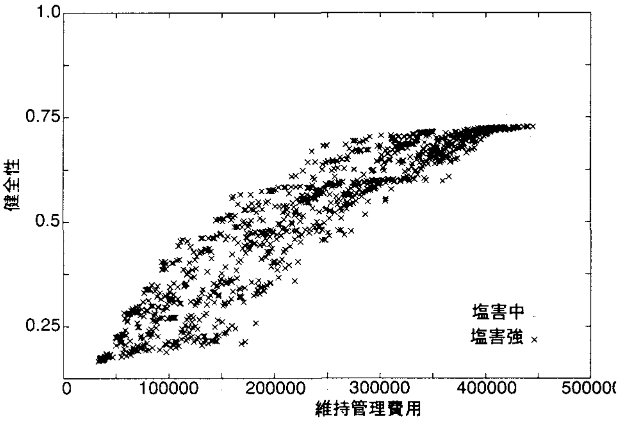
図−13. 中性化，塩害強環境下の比較(1)



図−14. 中性化，塩害強環境下の比較(2)



図−15. 維持管理費用と健全性の比較(1)

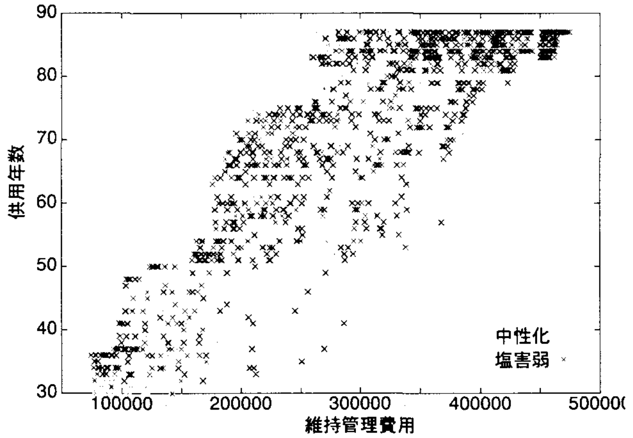


図−16. 維持管理費用と健全性の比較(2)

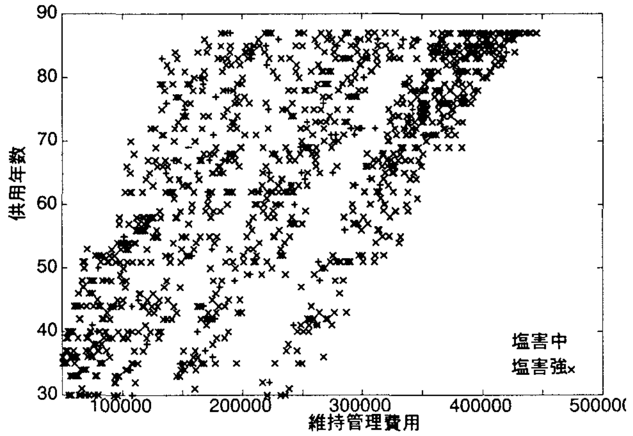
オフ関係は大きく変わる．費用対効果の分岐点が異なるため，同じ性能を有する計画を得ようとすると，費用が多くかかる可能性がある．

次に図－16 の塩害中と塩害強の比較に注目すると，中性化，塩害弱とは分布形状が全く違っている．解の集合は非常に凹凸が多く，解はかなり近くに集中している．

同様に維持管理費用と供用年数の関係を図－17，18 に示す．更に図－19，20 に供用年数と性能の関係を表す．図－17 が示すように中性化環境と塩害弱環境における費用対効果(供用年数)の傾向はほぼ同じである．ただし，凹凸が激しい．一方，図－18 が示すように，中性化と塩害中，強環境下の費用対効果は，形状が異なる．このことから，供用年数決定においても，各環境において，意志決定戦略を変更すべきである．



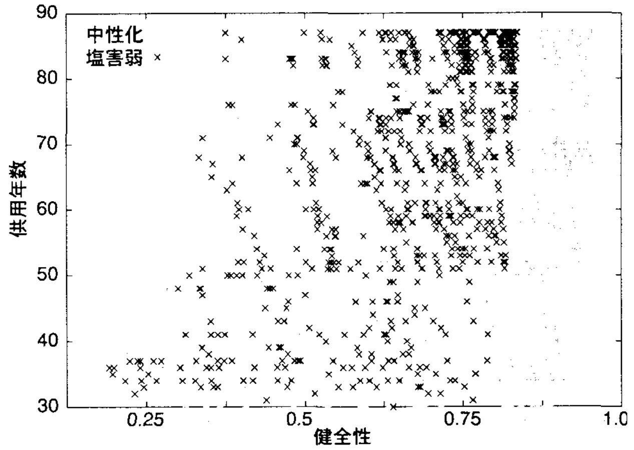
図－17．維持管理費用と供用年数(1)



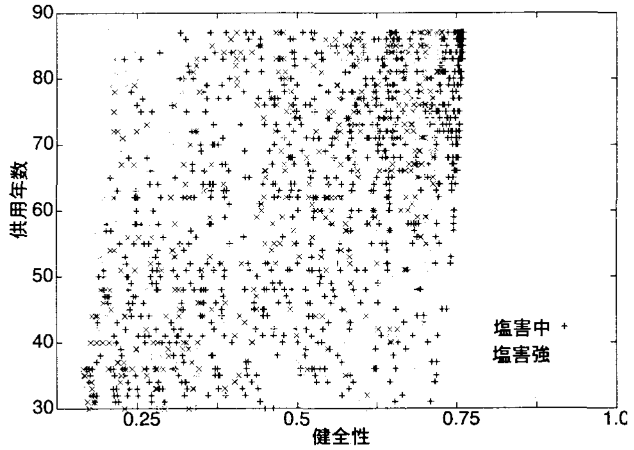
図－18．維持管理費用と供用年数(2)

また，図－19，20 が示すように，健全性と供用年数は強い関係がみられない．両者は維持管理費用を通して，結びついており，第3軸を考慮した上で，計画を考える必要がある．このような状況下で意志決定支援を行うシステムは存在して折らず，今後の課題としたい．

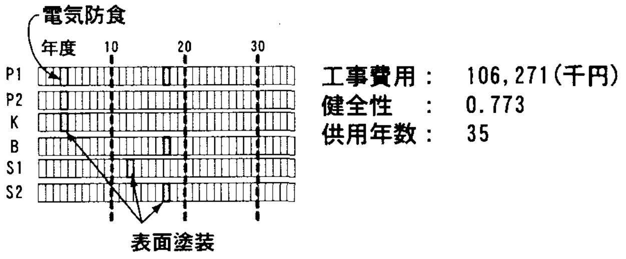
次に実際に，NSGA2 で求めた補修計画を比較する．図－21 に中性化環境の短期計画の一つを，図－22 に塩害弱環境の短期計画の一つをしめす．



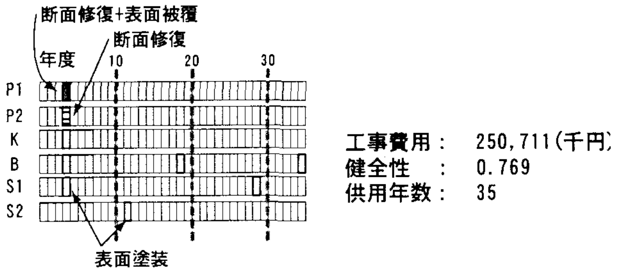
図－19．健全性と供用年数(1)



図－20．健全性と供用年数(2)



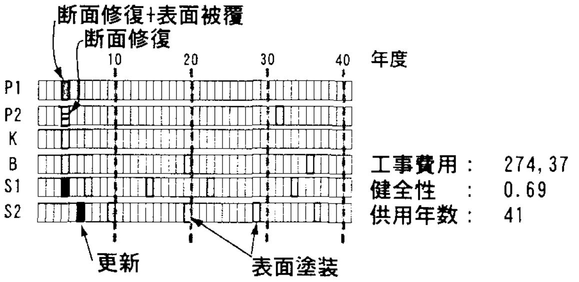
図－21．中性化の短期計画



図－22．塩害弱の短期計画

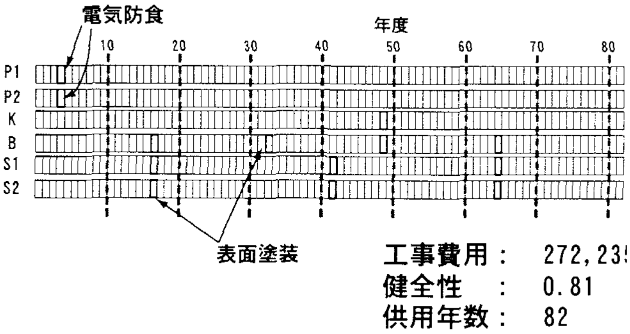
図－21，22 に示すように，35 年の短期の維持管理計画では，中性化と塩害環境では同じ性能を持つ補修計画を比

較すると約2.5倍の維持管理費用が必要になる．また補修内容も大きく変化している．中性化と塩害弱環境では床版の劣化が異なり，予算を約2.3倍必要とする．

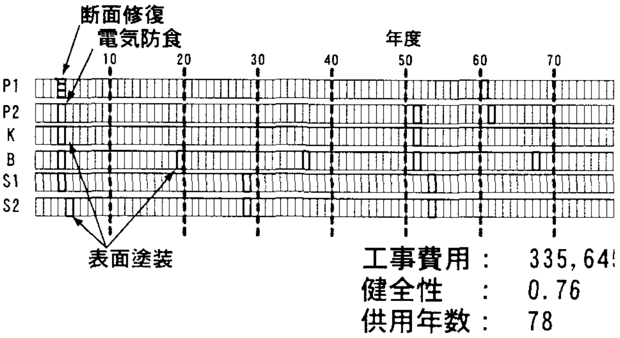


図－23. 塩害強の短期計画

一方，塩害弱と塩害強(図－23)を比較すると，塩害強は，塩害弱に比べ劣化が激しい床版に多くの補修を施す必要があり，その分の値段が変化している．ただし費用は中性化と塩害弱に見られるほどの大きな差は生まれていない．



図－24. 中性化の長期計画



図－25. 塩害弱の長期計画

80年前後の長期計画では，中性化(図－24)に比べ，塩害弱(図－25)では同じ性能を持たせるには，劣化が激しいため費用が増大する．これは当然の事である．ただし塩害弱の短期計画(図－22)に比べ，供用年数が2倍にのびるのに対し，費用は1.3倍にとどまっている．これは長期計画に合わせ，劣化を長期間抑止できる補修工法を有効に活用しているからである．

劣化が非常に激しい塩害強環境でも同様の結果が得られた．

5. 結論

本研究では，費用，健全性，供用年数の関係を明らかにする分析方法として多目的遺伝的アルゴリズムを用い，複数のパレート最適解を求めた．また近年注目を集めているNSGA2を採用し，システムを構築した．

最適化された複数の解が多数存在する事で，各目的関数間のトレードオフが明らかになり，費用対効果の分岐点も明らかになる．更にグラフを構成している解そのものは，補修計画である．

事前に定式化された関係はあくまでも推定値であり，実際の補修工法は離散値をとるため，実際の凹凸があるトレードオフ関係とは異なる可能性が高い．

そこで，事前にトレードオフ関係などを定式化し，必要な性能などを決定してから解を求めるのではなく，選択した解がそのまま実行解として使える，新しい分析，意思決定方法の可能性を示した．

これらの解を比較検討することで，費用対効果の観点や，短期，長期の計画による費用の変動，補修内容の変化から，簡単かつ合理的に維持管理計画を決定する事が可能になった．

しかしながら各解は更に最適化が可能である．今後は，探索性能を向上させていく必要がある．

参考文献

1) 伊理正夫，今野浩編．多目的最適化 数理計画法の応用<理論編>，産業図書，1982
2) 北野弘明編．遺伝的アルゴリズム2，産業図書，1995
3) 伊藤・高橋・古田・田丸・亀田．ライフサイクルコストを考慮したコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定，第7回システム最適化に関するシンポジウム，2001.
4) Hiroyuki Ito, Yuji Takahashi, Hitoshi Furuta, and Takahiro Kameda. *An Optimal Maintenance Planning for Many Concrete Bridges Based on Life-Cycle Cost.* IABMAS, 2002
5) 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]，土木学会，2001
6) 平成13年度版 国土交通省土木工事積算基準，(財)建設物価調査会，2001.
7) 中山弘隆，谷野哲三．多目的計画法の理論と応用，社団法人 計測自動学会，1999
8) GECCO 2003 in Chicago
9) K. Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap and T. Meyarivan. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm forMulti-Objective Optimization, Parallel Problem Solving from Nature(PPSN VI), 2000

(2004年9月17日受付)