

橋梁維持管理計画策定問題へのAnt Colony Optimizationの適用

The Application of Ant Colony Optimization
to Bridge Maintenance Planning宮園昌幸^{*}, 河村圭^{**}, 江本久雄^{***}, 中村秀明^{****}

Masayuki MIYAZONO, Kei KAWAMURA, Hisao EMOTO and Hideaki NAKAMURA

^{*}山口大学 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)^{**}博(工) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科^{**}修(工) 山口大学大学院 理工学研究科システム工学専攻^{****}博(工) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科

This paper proposes Ant Colony Optimization(ACO) to the bridgemaintenance planning problem which can be fomulated as a combinational optimization problem. Current Genetic Algorithms (GAs) based method performs poor when the search space is extended. In this paper, we proposes a scheme based on ACO to deal with this problem due to its having simple operation, hi-speed computational time and adaptability to large search space. The effectiveness of ACO has been confirmed through systematic investigation on several examples.

Key Words: BMS, Combinational problem, Ant Colony Optimization, GAs

1 はじめに

わが国では、1950年代後半から1970年代前半のいわゆる高度経済成長期に、社会基盤施設への集中的な資本投資が行われ、社会基盤施設の建設が急速に進んだ。以来、わが国の社会資本ストックは増加の一途にあり、その総数は膨大なものとなっている。社会資本ストックの増加の一方で、高度経済成長期に建設された多数の施設は建設から既に30年以上が経過しており、性能の低下は必然であり、早急に何らかの維持管理対策が必要な施設も少なくない。一般的に、供用下にある施設の機能を維持しつつ作り変えるには、新設に比べて数倍のコストが掛かるといわれている。しかし、近年の国内の経済状況の変化から、公共投資予算は大幅に削減の方向に進んでおり、現存する社会資本ストックに対して、合理的な維持管理することが必要とされている¹⁾。

このような背景の下、社会基盤施設の1つである橋梁の維持管理を合理的に実施する為のシステムとして、「Bridge Management System : BMS」開発の必要性が増してきている。本研究室では、橋梁の維持管理支援システムとしてJ-BMSの開発を行ってきており、そのサブシステムの1つに「維持管理計画策定システム」がある。これは、予算制約内で最適な維持管理計画を策定するための機能であり、その計画の提案を行う為の最適化アルゴリズムの検討が本研究の対象である。

維持管理計画の策定とは、多数ある維持管理対策の組み合わせから、ある評価指標（経済性、品質、安全性、

機能性、環境性、耐震性など）を最大化、もしくは最小化するような対策の組み合わせを決定することである。従来J-BMSではその探索手法に、進化的計算手法の一つである単純遺伝的アルゴリズム²⁾（Simple Genetic Algorithm : SGA）を用いてきた。SGAは近似最適解（準最適解）を高速に求めることができる反面、解空間の拡大に伴って、準最適解の最適解に対する精度の低下が生じ、計算時間が増加するという欠点を持つ。

そこで本研究では、蟻の採餌行動をモデルとしたAnt Colony Optimization^{3), 4)}（以下、ACO）を橋梁維持管理計画策定問題に適用し、その有効性について検討した。

2 橋梁維持管理計画策定問題の概要

維持管理計画の策定とは、橋梁の供用年数(耐用年数)において多数ある維持管理対策の組合せから、制約条件を満足し、さらに評価指標(経済性、品質、安全性、機能性、環境性、耐震性など)を最大化または最小化するような維持管理計画を決定することである。本研究において対象とする最適化問題の概要は以下のとおりである。

- (1) 目的は、維持管理対策費用の最小化である。ただし、費用は割引率によって現在割引価値に換算する。
- (2) 橋梁の評価指標は *Condition* と *Safety* である。各年における *Condition* を 3.0 以下に保ち、同様に *Safety* を 0.91 以上に保つことを制約条件とする。
- (3) 維持管理対策は Silane（シラン：表面保護工）と Rebuild（架替え）である。

また、上記の条件をより詳細にし、維持管理コストと

各評価指標への影響をまとめたものを表-1 に示し、
Condition、*Safety* の推移の一例をそれぞれ図-4、図-5 に示す。以上から対象とする最適化問題は式(1)から式(5)のように定式化される。

Object

$$f = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \rightarrow \min \quad (1)$$

C_t : t 年の対策費用

r : 割引率

t : 経過年数

T : 予定供用年数

$$C_t = \begin{cases} 0 & X_t = 0 \\ Cost_{Silane} & X_t = 1 \\ Cost_{Rebuild} & X_t = 2 \end{cases} \quad (2)$$

Subject to

$$X_t \in \{0,1\} \quad (3-a)$$

$$X_t \in \{0,1,2\} \quad (3-b)$$

X_t : t 年の対策工法種類

0: 対策なし

1: Silane 対策

2: Rebuild 対策

$$Condition_t < 3.0 \quad (4)$$

$$Safety_t > 0.91 \quad (5)$$

$Condition_t$: t 年の $Condition$ 値

$Safety_t$: t 年の $Safety$ 値

3 ACO の概要と適用方法

3.1 ACO の概要

ACO とは蟻の採餌行動をモデルにした発見的最適化手法である。これは、蟻の巣から餌までの最適な経路の構築が、経路上のフェロモンの蓄積によって定まるというメカニズムにアイデアを得た手法である。

まず、ACO の基となった蟻の採餌行動について説明する。図-1 のように、蟻の巣(Nest)から、餌(Food)までの間に障害物(Barrier)がある場合、蟻は障害物を迂回する二つの経路(Path)A および経路 B を通って餌を採取する。ここで、経路 A は経路 B より短いものとする。

採餌行動の初期段階において、蟻たちはどちらの経路が短いかわからないので、ランダムに経路を選ぶ。そして、自分が通った経路にフェロモンを残しつつ、餌を採取し、基のルートをとって巣に戻る。蟻の歩行速度が、全ての蟻についてほぼ等しいとすると、短い経路を選んだほうが、早く往復できる。その結果として、短い経路には長い経路よりも早くフェロモンが蓄積される。フェロモンには蟻を惹きつける性質があり、フェロモンの蓄積量の多い経路ほど、蟻たちが選択する確率が高くなり、最終的には、全ての蟻が短い経路を選ぶようになる。

組み合わせ最適化問題に対して ACO を適用する場合、

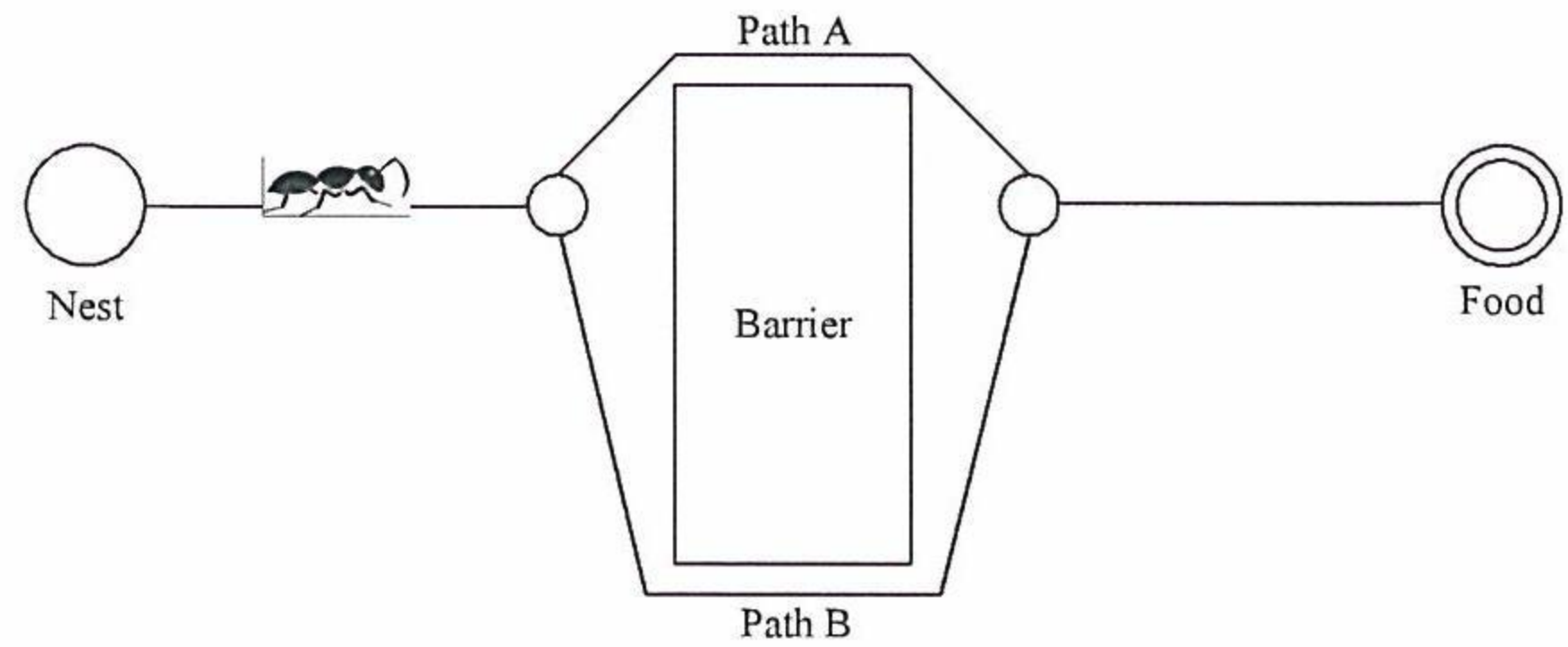


図-1 蟻の採餌行動のモデル

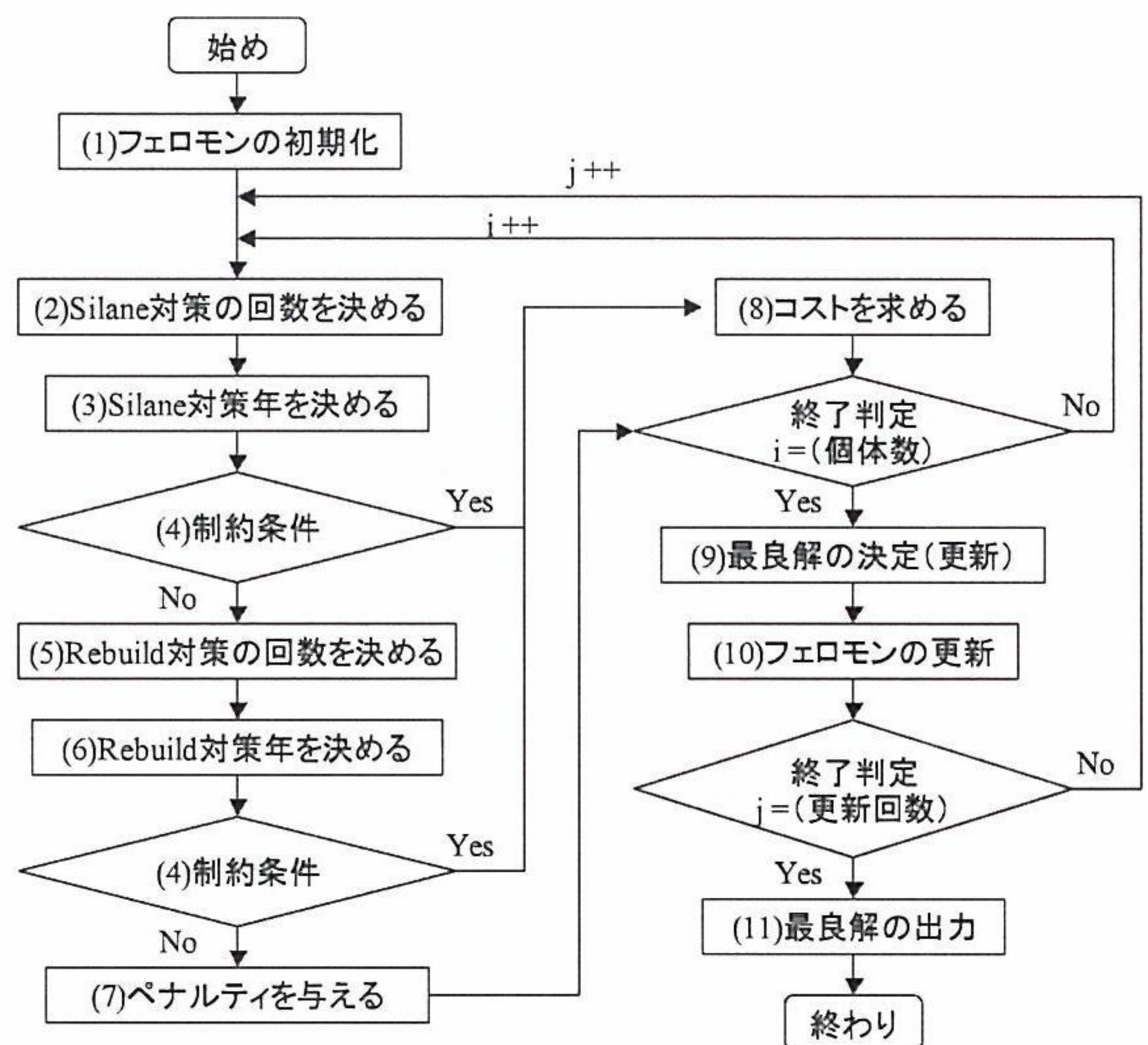


図-2 ACO による構造物維持管理計画の処理手順

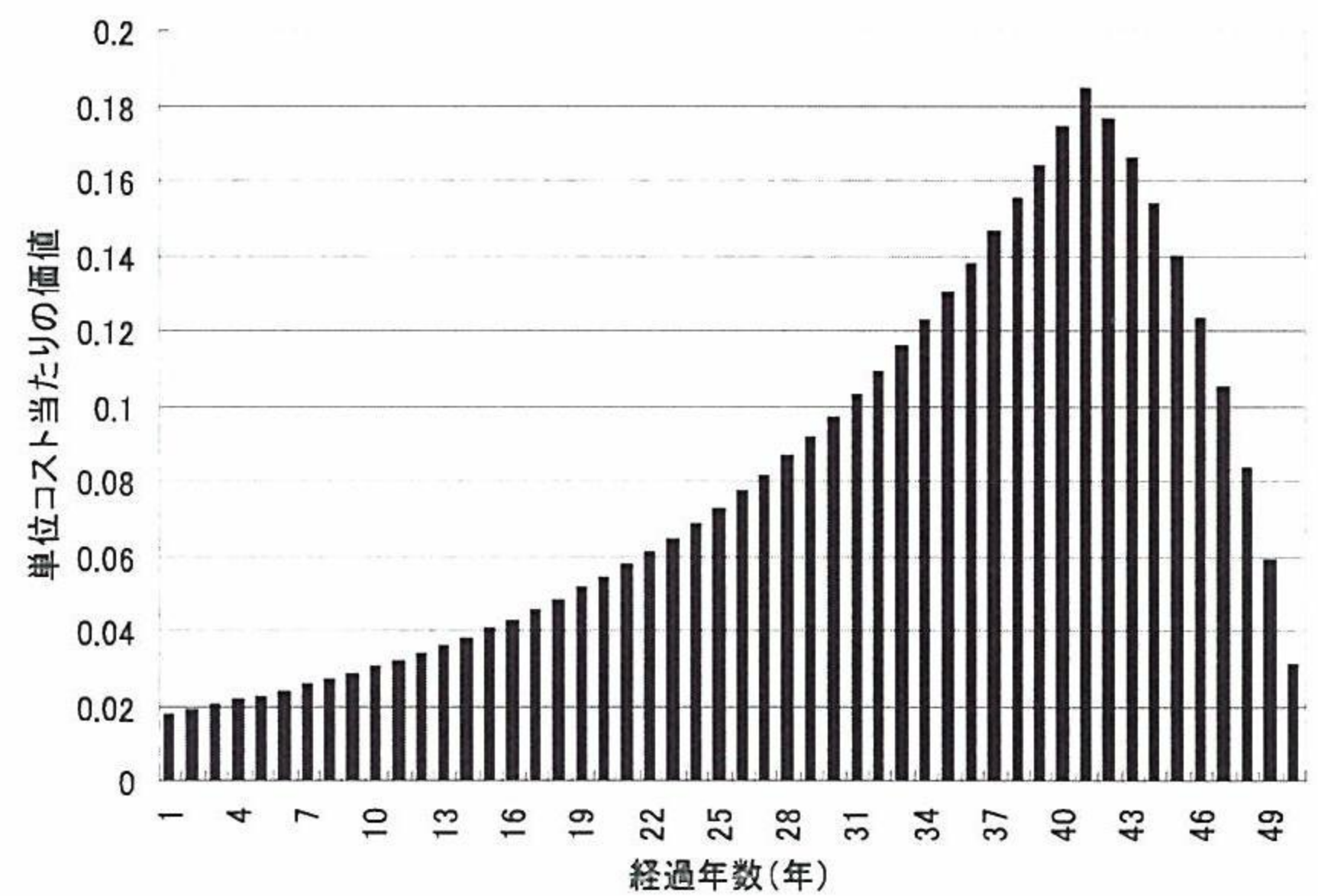


図-3 Silane 対策の単位コスト当たりの価値

欲張り法のアイデアを用いる。欲張り法は、解の構成要素に対する局所的な評価に基づき、構成要素を逐次的に追加していくことで実行可能解を構成する方法である。ACO では探索中に得られた解の構成要素に得点（これをフェロモンと呼ぶ）を追加し、フェロモンの情報によって修正された局所的評価を用いて、ランダム化欲張り法を繰り返して解候補を構成する。以下にアルゴリズムの概要について記述する。

(1) 解の構成要素全てに対して、フェロモンの値を初

期化する。

- (2) 解集合 $Q := \{\phi\}$ とした後、次のステップ a と b を反復して、新たな解集合 Q を得る。
 - a: フェロモンの値により修正された局所的評価に基づき、ランダム化欲張り法を用いて解を生成する。
 - b: ステップ a で得られた解を初期解として、これに単純局所探索法を適用し、局所最適解を得る。
- (3) 解集合 Q に含まれる構成要素に対し、フェロモンの情報を更新する。
- (4) 設定された終了条件が満たされれば、近似最適解を出力して探索を終了する。そうでなければ、(2) へ戻る。

3.2 橋梁維持管理計画策定問題への ACO の適用

図-2 に ACO による橋梁維持管理計画の処理手順を示す。以下に各手順の詳細について述べる。

手順(1) フェロモンの初期化

フェロモンは、Silane 対策の回数、Rebuild 対策の回数、Silane 対策の実施年、Rebuild 対策の実施年の決定にそれぞれ関係する、4つのフェロモンを用意する。ここで、各フェロモンを区別するため、それぞれ、Silane 対策回数フェロモン、Rebuild 対策回数フェロモン、Silane 対策実施年フェロモン、および Rebuild 対策実施年フェロモンと呼ぶことにする。

回数を決めるフェロモンの初期値はすべて 1 とし、実施年を決めるフェロモンの初期値は手順(3)で述べる。

手順(2) Silane 対策の回数を決める

Silane 対策の回数を Silane 対策回数フェロモンの値を基に決定する。

ただし、Silane 対策の効果持続時間内には、新規に Silane 対策は実施できない。本問題において、予定供用年数は 50 年間であるから、Silane 対策の実施は最多でも 5 回に制限される。

手順(3) Silane 対策年を決める

ここで、3.1 節で記述したとおり、ランダム化欲張り法のアイデアを用いる。対象問題では、対策の価値とコストから単位コスト当たりの対策の価値を求め、対策価値に対して欲張り法を適用する。以下に対策の価値を求める手順について記述する。

Silane 対策は劣化を遅延させるという効果がある。表-1 に示すように、何も対策を行わない場合、Condition の 1 年あたりの減少量は 0.08(point)であるが、Silane 対策の実施により Condition の減少量は 0.01(point)に軽減される。つまり Silane 対策を実施することにより、対策を行わない場合よりも 1 年あたり 0.07(point)の軽減効果を得ることができる。また、Silane 対策の効果持続期間は 10 年間

表-1 対象問題に対するパラメータ

維持管理計画策定に関するパラメータ	指標値
(1) 耐用年数	50
(2) Condition の初期指標	任意
(3) Safety の初期指標	任意
(4) 割引率	任意
(5) Condition の劣化率(/year)	0.08
(6) Safety の劣化率(/year)	-0.015
(7) Silane 対策のコスト(GBP:英ポンド)	39k
(8) Silane 対策の Condition への効果	0.01
(9) Silane 対策の Safety への効果(/year)	-0.007
(10) Silane 対策の効果持続時間(years)	10
(11) Rebuild 対策のコスト(GBP)	7410k
(12) Rebuild 対策の Condition への効果	to 0.0
(13) Rebuild 対策の Safety への効果	to 2.16
(14) Rebuild 対策による Condition への劣化遅延期間(years)	15
(15) Rebuild 対策による Safety への劣化遅延期間(years)	27

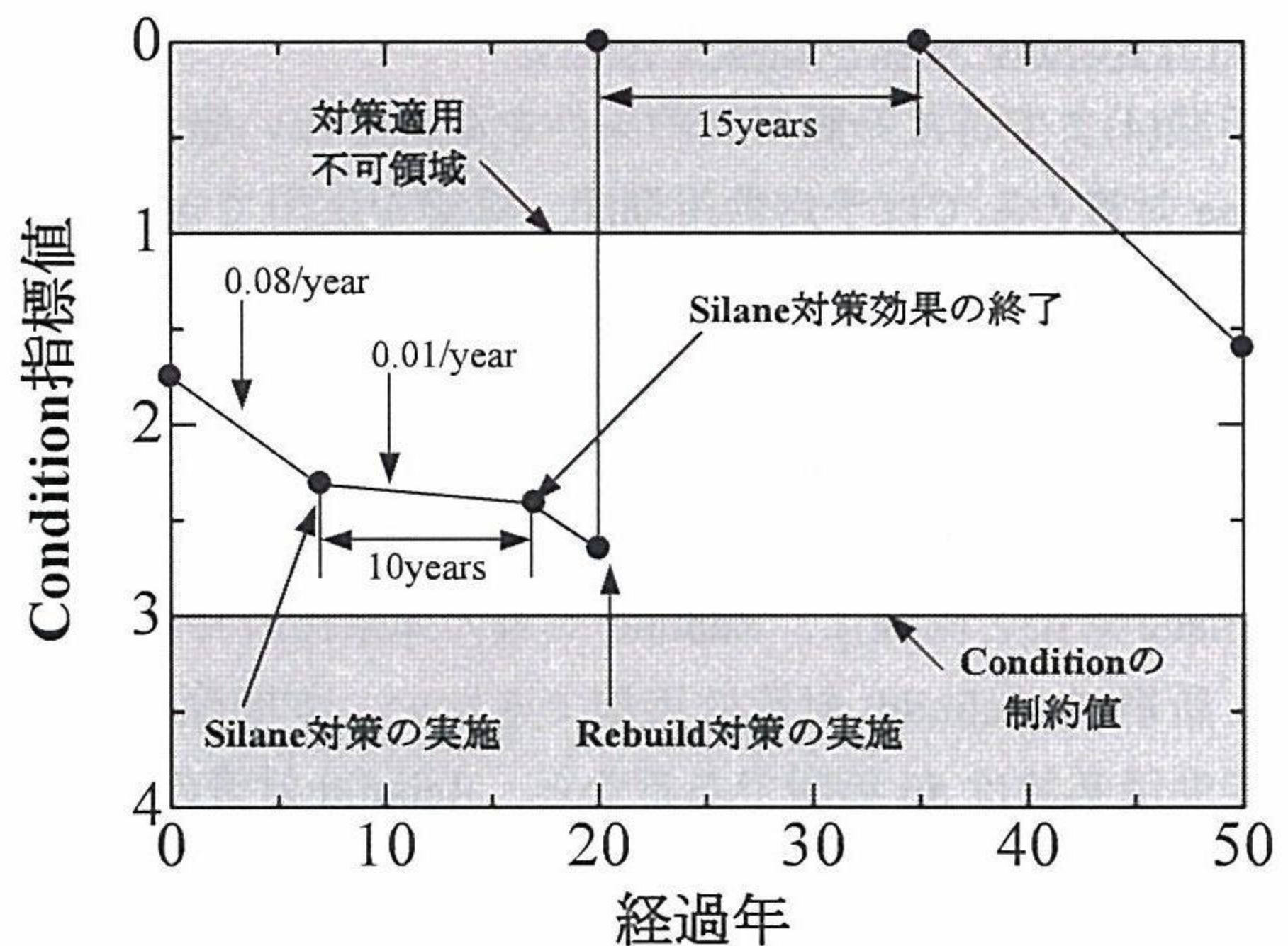


図-4 Condition の推移の一例

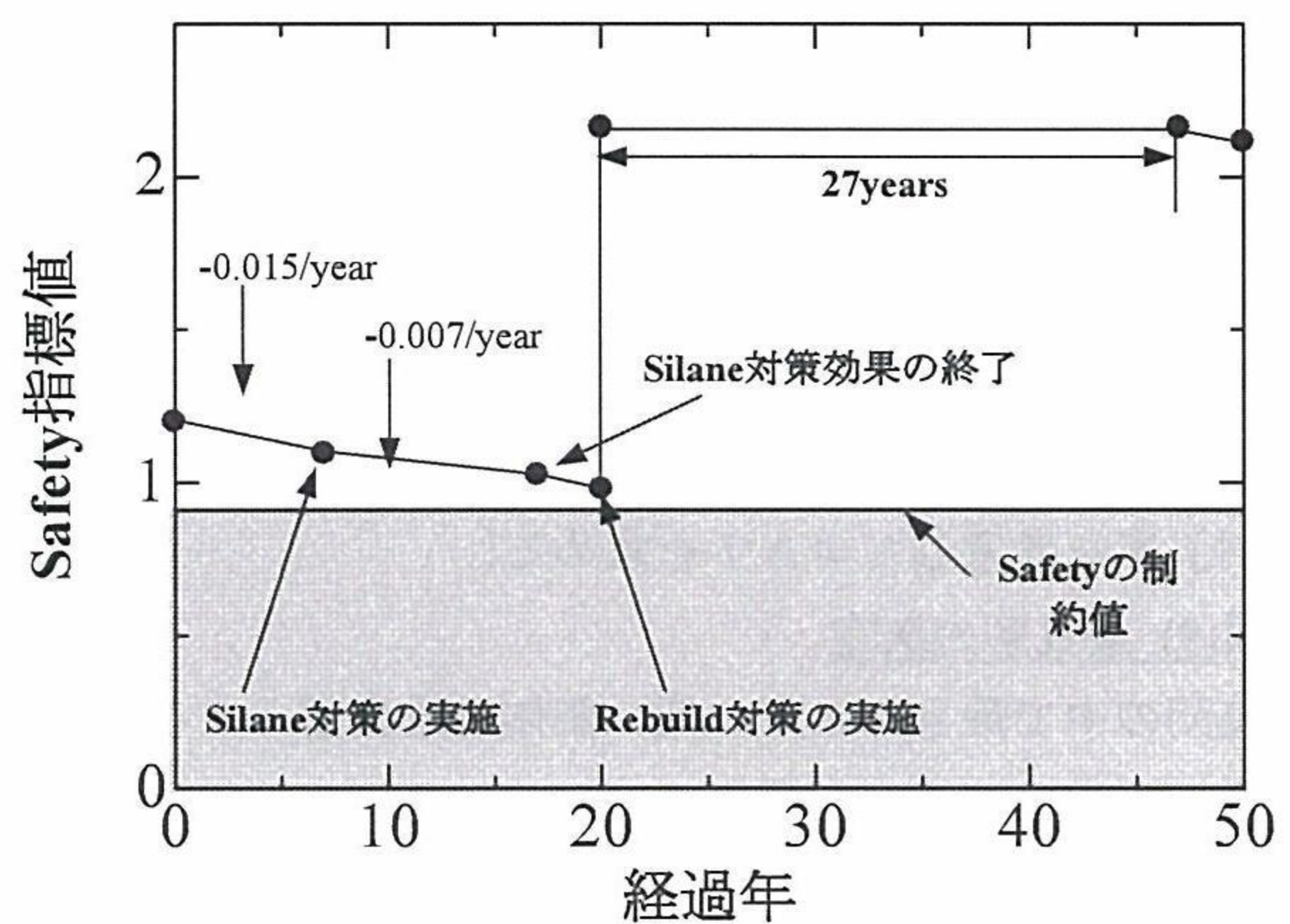


図-5 Safety の推移の一例

であるから、1回の Silane 対策には $10 \times 0.07 = 0.7$ (point) の Condition 減少量の軽減効果がある。この軽減効果を Silane 対策の価値と呼ぶ。

しかし、実施する年によってはその価値が低下する場合がある。例えば予定供用年数が 50 年であるとき、経過年数が 48 年の時点で Silane 対策を実施する場合、その効果を楽しむ期間は 2 年間となる。従って、この場合の Silane 対策の価値は $2 \times 0.07 = 0.14$ (point) に低下する。

次に、対策コストについて説明する。対策のコストは割引率によって異なるが、割引率が 0.0 の場合を除いて、年が経過するほどコストは低下する。つまり対策を遅らせれば低コストで対策が実施できる。

このことから、経過年数における、単位コスト当たりの対策の価値を求めることができ、この値を Silane 対策実施年フェロモンの初期値とする。各年における Silane 対策の単位コスト当たりの価値を図-3 に示す。図-3 では予定供用年数は 50 年、割引率は 0.06 として計算した。

手順(4) 制約条件

手順(3)で求めた Silane 対策の計画が、制約条件 (式(4), (5)) を満たさない場合は手順(5)以降のステップへ、そうでない場合は手順(8)へと進む。

手順(5) Rebuild 対策の回数を決める

手順(4)まで得た計画が制約条件を満たさない場合、Silane 対策のみでは予定供用期間、橋梁を供用できないと判断される。この場合、手順(5), (6)で Rebuild 対策の対策回数と実施年を決める必要がある。

この手順では、Rebuild 対策の回数を Silane 対策と同様に Rebuild 対策回数フェロモンを用いて決定する。

Silane 対策と同様に、Rebuild 対策の効果持続時間中には、新規に Rebuild 対策は実施できない。本問題には、予定供用年数は 50 年間であるから、Rebuild 対策の実施は最多でも 2 回に制限される。

手順(6) Rebuild 対策年を決める

Rebuild 対策についても Silane 対策と同様に考え、対策の価値を計算し、割引率を適用した対策コストで除することにより、単位対策コストを求める。この単位対策コストを Rebuild 対策実施年フェロモンの初期値とする。

手順(7) ペナルティを与える

Rebuild を行っても制約を満たさない計画にはペナルティとして、計画のコストを $f = f + 4000.0$ とする。

手順(8) コストを求める

割引率を考慮してコストを求める。

手順(9) 最良解の決定

集団の中で最もコストの低い個体を最良解とする。

手順(10) フェロモンの更新

手順(9)で決定した最良解をもとにフェロモンを更新する。例えば最良解が、10 年目と 20 年目に Silane 対策を

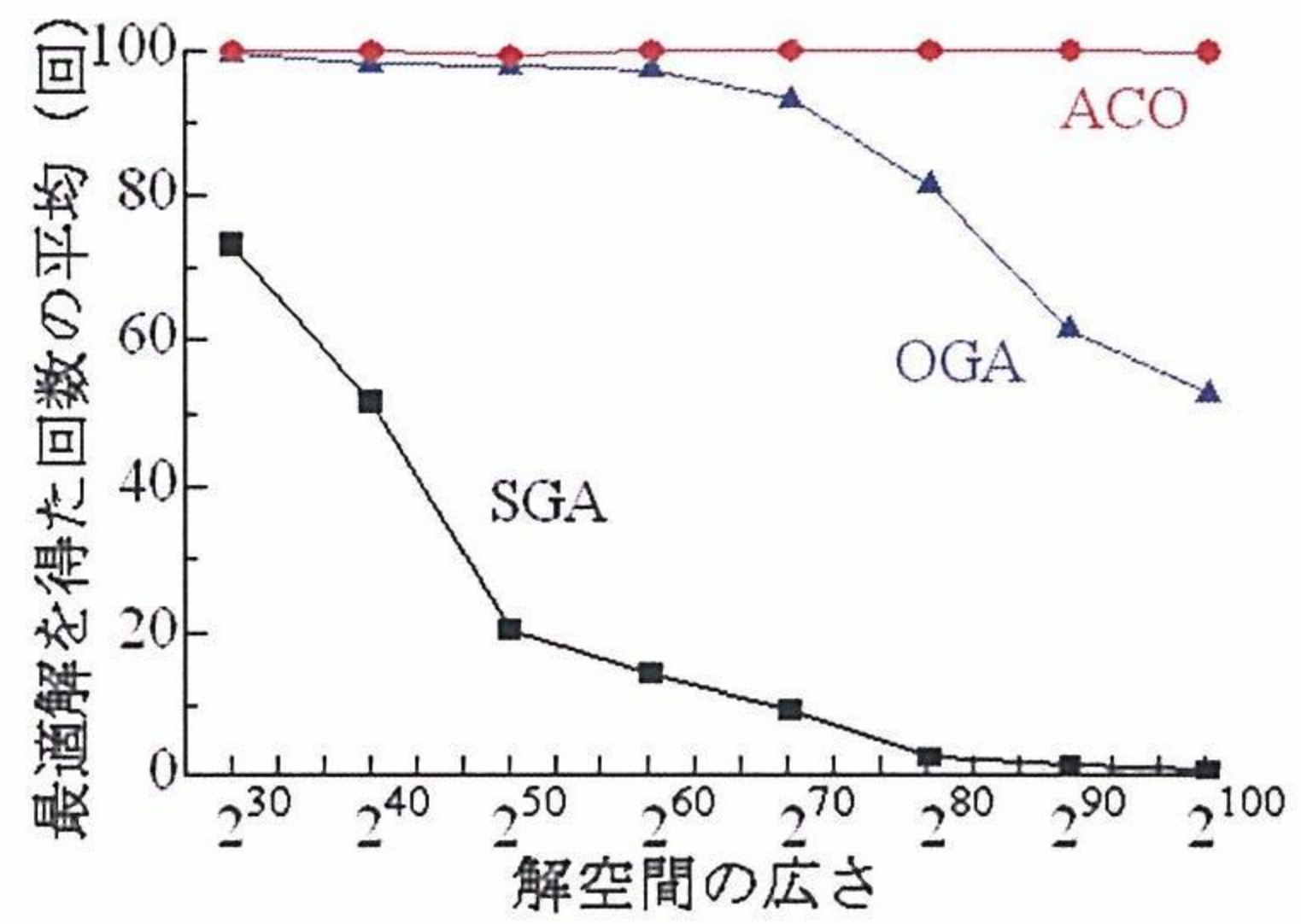


図-6 解空間の広さと最適解獲得回数

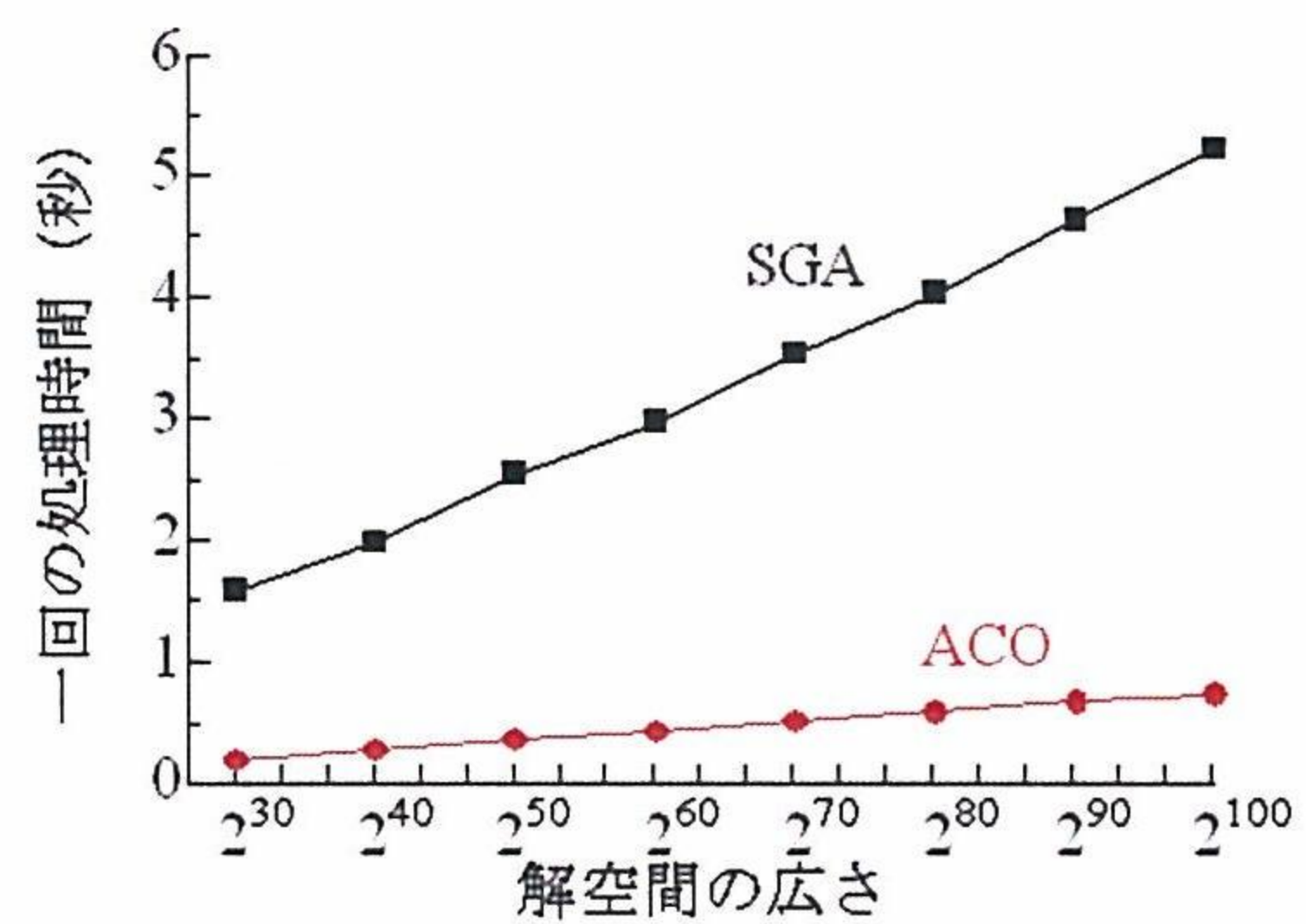


図-7 解空間の広さと処理時間

表-2 設定問題の一覧

パラメータ	Case1	Case2
耐用年数	50	50
Condition の初期値	1.75	1.75
Safety の初期値	1.50	1.20
対策工法	Silane	Silane, Rebuild

表-3 実験パラメータ

	ACO	SGA	OGA
個体数	40		
世代数 (更新回数)	200		
更新フェロモン量	1.0		
選択手法		ルーレット選択 + エリート保存選択	トーナメント選択 + エリート保存選択
交叉		一点交叉	二点交叉
交叉率		1.00	
突然変異		通常の突然変異	
突然変異率		0.02	0.10

行い、30年目に Rebuild 対策を行う、という計画案であれば、対策回数フェロモンの Silane 対策 2 回、Rebuild 対策回数フェロモンの Rebuild 対策 1 回にそれぞれフェロモンを蓄積し、さらに Silane 対策実施年フェロモンの 10、20 年と Rebuild 対策実施年フェロモンの 30 年にそれぞれフェロモンの蓄積を行う。蓄積するフェロモンの量は、1 回当たり、すべて 1.0 とする。また、ACO においてはフェロモンを蒸発させるという考えもあるが、本研究では蓄積のみとする。

手順(11) 最良解の出力

フェロモンの更新回数があらかじめ設定した回数に達したとき、それまでに探索した中で最もコストの低い個体を最適解として出力する。

4. 遺伝的アルゴリズムとの性能比較実験

4.1. ナップザック問題への適用

ここでは、ACO の性能を評価するために、単純遺伝的アルゴリズム(以下、SGA という)とメタ GA[2]によってパラメータを最適化した GA(以下、OGA という)との比較実験を行う。

ここでは、組合せ最適化問題の代表例としてナップザック問題を用いる。実験では、30、40、50、60、70、80、90、100 荷物のナップザック問題それぞれ 10 問ずつに対して、SGA、OGA、ACO を適用し、最適解を得た回数の平均と計算時間の平均について比較した。また、各問題における試行回数を 100 回とし、SGA、OGA、ACO の個体数と世代数をそれぞれ 100 個体、400 世代とした。

実験結果を図-6 および図-7 に示す。図-6 より ACO は 2^{100} ほどの解空間であれば、ほぼ確実に最適解を獲得可能である。それに対して SGA、OGA では解空間の拡大に伴って最適解獲得回数が低下している。これは、ACO が単位重さあたりの荷物の価値という事前情報を十分に活用できたのに対して、SGA、OGA は解空間の探索が十分に行かず、局所最適解に陥ってしまった為であると考えられる。

次に、アルゴリズムの計算時間についてであるが、50 荷物のとき、ACO は 0.36s であったのに対して、SGA は 2.55s であった。さらに、荷物数を 100 に増やしたとき、ACO は 0.67s、SGA は 5.21s となり、荷物数の増加に対して計算時間の増加率も ACO の方が緩やかであった。

4.2. 橋梁維持管理計画策定問題への適用

4.2.1. 実験に用いた問題設定と解説

実問題では、表-2 に示すような 2 ケースの問題を設定した。まず、Case1 では対策工法が Silane のみであり、設計変数 x_i の値は式(3-a)に示すように Silane 対策を行う ($x_i=1$)、または行わない($x_i=0$)の 2 通りの組合せとなる。耐用年数は表 1 に示すように 50 年であることから、設計

表-4 Case1 の実験結果

割引率		0.0%	6.0%
最適解		156.0	44.5
ACO	OPT	100/100	100/100
	AVE	156.0	44.5
	VAR	0.0	0.0
OGA	OPT	100/100	31/100
	AVE	156.0	46.1
	VAR	0.0	1.8
SGA	OPT	100/100	19/100
	AVE	156.0	48.5
	VAR	0.0	10.7

表-5 Case2 の実験結果

割引率		0.0%	6.0%
最適解		7410.0	763.2
ACO	OPT	100/100	10/100
	AVE	7410.0	827.9
	VAR	0.0	4806.3
OGA	OPT	100/100	1/100
	AVE	7410.0	1096.2
	VAR	0.0	24909.2
SGA	OPT	100/100	0/100
	AVE	7410.0	1619.0
	VAR	0.0	106854.9

変数の組合せ数は 2^{50} 通りとなる。

次に、Case2 では対策工法が Silane と Rebuild の 2 種類であり、式(3-b)に示すように設計変数 x_i の値は、対策を行わない($x_i=0$)、Silane 対策を行う($x_i=1$)、および Rebuild 対策を行う($x_i=2$)の 3 通りあり、耐用年数が 50 年であることから、設計変数の組合せ数は 3^{50} 通りとなる。したがって、Case2 は Case1 と比べ解空間が広く、問題が複雑である。また、比較実験では、割引率を考慮する場合としない場合について行った。実験で使用した各アルゴリズムのパラメータを表-3 に示し、実験結果を表-4 および表-5 にまとめる。また、SGA のパラメータは一般的な値を基に試行錯誤的に調整した。また、シミュレーションに用いた CPU は Pentium4 2.6GHz、メモリは 512MB である。ここで表中の OPT は 100 回試行中における最適解獲得回数であり、最適解獲得回数/試行回数 で表す。AVE は準最適解の平均対策コスト、VAR は対策コストの分散を表す。

4.2.2. 実験結果の考察

割引率が 0.0%の場合、すなわち割引率を考慮しない場合はいずれの手法においても 100 試行中 100 回とも最適

解が獲得できた。一方、割引率を考慮した場合は、表-4, 表-5 の網掛け部分に示すように最適解を得ることは難しくなる。これは、割引率を設定したことにより、最適解がひとつしか存在せず、探索が困難であるためと考えられる。

また、解空間が広い Case2 においても、ACO は GA と比較して、高い最適解の獲得回数を示した。また、最終的に出力された近似最適解の平均コスト、分散も小さく、ACO は GA と比較して最適解に近い近似最適解を獲得していたと考えられる。

以上のことから、ACO は SGA や OGA と比べて、その有効性が明らかとなった。

5. 結論

本研究では ACO を橋梁維持管理計画策定問題に適用し、SGA や OGA と比較することで、その有効性について検証した。本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ACO は GAs と比較して、遺伝的操作のような複雑な操作がなく、実問題への適用が簡易である。
- (2) ナップサック問題のような解要素の価値が事前に計算できる組み合わせ最適化問題において、ACO は GAs と比較して、高い最適解獲得性能を有し、その計算時間も高速であることが示された。
- (3) 割引率を考慮した困難な問題においても、GA を用いた場合とと比較して、ACO を用いた場合は高い確率で最適解を獲得可能である。

参考文献

- 1) セメント・コンクリート，社会法人セメント協会 No.656, 2001.10
- 2) 伊庭齊志：遺伝的アルゴリズムの基礎 - GA の謎を解く -，オーム社，1994.9.20
- 3) 柳浦睦憲，茨城俊秀：組合せ最適化 - メタ戦略を中心として -，朝倉書店，2001.1.20
- 4) Marco Dorigo and Thomas Stutzle : *Ant Colony Optimization* , Bradford Books, 2004.6.4