土木学会論文集 No.482/Ⅳ-22, pp.37~46, 1994.1

# 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用

田村　亨*・杉本博之*・上前孝之**

近年，離散的最適化問題，あるいは組合せ最適化問題の有力な解法として遺伝的アルゴリズム（genetic algorithms）が注目されて来ている．この方法はダーウィンの自然淘汰説を基本概念とするもので，繁殖・淘汰，交叉，突然変異を基本オペレータとした手法である．本研究では，この手法を道路整備順位決定問題に適用したもので，厳密解法と解のランダムサーチとの比較からGAの有効性を検討したものである．

***Key Words*：*genetic algorithms, road networks optimization***

## 1. はじめに

道路整備順位の決定問題は，最適ネットワーク計画の中心的課題としてこれまでにも多くの研究がある．その中で最適解の検索に関わる研究課題の1つは，対象ネットワークが大規模になった場合の計算効率である．現在までに，ネットワークを部分分割する方法や階層化して解く方法等のいくつかの工夫がされてきているが，計算時間の縮小と精度の向上とが同時に達成され，実用化されるところまでは至っていない．

一般に，道路ネットワークの最適化問題では，ネットワークの計画変数であるリンクの付与と除去，あるいは車線数の増減を離散変数として取り扱うことが多い．これは，道路が車線単位で決定されることを考えると現実的な方法であるが，この場合は組合せ最適化問題の解法となり，連続変数として取り扱う場合に比べて，一般に膨大な計算量が必要とされている．

遺伝的アルゴリズム（genetic algorithm：以下，GAと略す）は，J.D. Bagleyにより1967年に初めて用いられた用語であるが，その手法は組合せ最適化の解法に優れているとされ，最近注目されてきている．この方法は生物進化の過程をダーウィンによる適者生存の過程と考え，現存する生物群を環境に対してより高い適合性を持った準最適な生物とみなす．その上で，繁殖・淘汰，遺伝子の交叉，及び突然変異のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え，それを最適化の手法として用いようとするものである．

本研究は，道路整備順位決定問題へのGAの適用を試みたものであり，ケーススタディをとおし厳密解法，解のランダムサーチとの比較からGAの有効性を検討することが目的である．

なお，GAはより複雑な離散型組合せ最適問題の解法に優れた方法とされ，最近わが国でも盛んに研究されてきているが，2章（2）で詳述するように，最適解探索の計算時間が短くて済む理由については，GAの挙動を知る手がかりを与える理論的研究があまり進んでいないのが現状である．このため，GAの先進研究として既存解法との比較を行う努力も行われているが，GAは動的計画法や分枝限定法とは異なり確率的近似解法であるため，同一条件下での手法の比較が難しく，まだなされていないのが現状である．これらの点から，GAの工学的利用法としては，計算時間が膨大なためこれまで分析されていなかった問題に対して取りあえずの近似解を求めておく，等のことが考えられる．その意味では，本研究で扱う分析対象がGAの能力を十分に生かしたものとは言えなく，GAの適用に関する基礎的研究と位置付けられる．

## 2. 道路整備順位決定問題とGA

### （1） 道路整備順位決定に関わる課題の整理

道路整備順位決定とは，予算制約のもとで，いつ，どこから整備するかを決めることと考えられ[1]，研究は大きく2つに分けられる．1つは最適解の探索に関わるものであり，他の1つは評価関数の設定に重点を置いたものである．前者の研究は伝統的な交通ネットワークの最適化モデルとして位置付けられ，ネットワークを構成する最適なリンクの組合せを求める整数計画問題として定式化されるのが一般的である．後者の研究には，整備による利便性向上，経済性，環境といった複数の評価項目の整理とその総合化に着目したものがあり，多属性効用関数による研究[2]，評点法による研究[3]，階層分析法による研究[4]などがある．また，土地利用（住宅立地）と道路整備がもたらす影響を評価主体間において多目的計

* 正会員　工博　室蘭工業大学助教授　工学部建設システム工学科（〒050　室蘭市水元町27-1）
** 正会員　北海道 網走土木現業所　技師

画法により最適化した先駆的研究もある[5].

本研究は，離散型組合せ最適化の解法に優れているとされるGAを道路整備順位決定問題に適用することが目的であるため，前者の研究に位置付けられる．この分野の研究は，従来ネットワーク交通流の分析手法に関する研究が十分でないこともあって，交通フローは必ずしも明示的に扱われておらず，研究の関心は膨大な数の組合せの中から最適解を効率的に発見する解法の開発にあったと言える．また，取り扱える問題の規模にも限界があり，交通計画におけるモデルの有効性について現実的な視点からの批判もあった．しかし，最近では解法の改良によって，計算時間に問題はあるが比較的大規模なネットワークを扱うことも可能となってきている．また，最適解の探索に力点を置きながら評価関数に工夫をしている研究もある．その代表例は西村らの研究[6]で複数の評価指標を持つ場合への展開の事例である．さらに，複数主体間の評価関数を総合化し分析しているものもある[7].

最適解探索についての研究レビューは既に多くのものがあり，厳密解法・近似解法が体系的にまとめられている[8),9]．本研究では，GAによる解法と従来の近似解法との比較を行うことが目的ではないので，解探索法については他の文献に委ねる．また，問題設定として「OD交通量を所与とするか否か」,「計画変数を連続変数として扱うか否か」により，その解法が自ずと異なってくるが，本研究では最も基本的な問題設定のもとで分析を進めることとした．

### （2） GAと本研究の問題設定

GAはJ. H. Hollandによる1975年の理論的考察[10]により広く知られるようになり，1985年には第1回目の国際会議が開かれた．わが国でも日本ファジー学会誌（1991）[11]や計測と制御（1993）[12]でも特集が組まれるようにまでなってきている．

GAの基本プロセスは，繁殖・淘汰，交叉，突然変異の3つのプロセスであり，このGAの基本的プロセスを以下で簡単にまとめる．

GAではまず設計変数のコーディングが重要である．GAでは，生物の染色体に対応して，ある文字（遺伝子）でコーディングされた線列があり，この線列が生物の染色体の役割と同じように最適情報を持つと考える．最初にある決められた$N$個（集団サイズと呼ぶ）のコーディングされた線列を確率的に任意に定めこれを初期世代とする．ここで，1線列は1個体に相当し，線列集団を交配プールと呼ぶ．

次が繁殖・淘汰プロセスである．GAでは，各線列の適応関数の値の相対的な関係が，線列を次世代に残す（繁殖）か残さない（淘汰）かの判断材料になる．ここでは，初期世代の$i$番目の線列の適応度評価を全ての$i$について計算する．この値が高いことは（目的関数最大化の場合），その個体の環境への適応が高いことを意味し，適応度の高い個体は1個以上の子供を次世代に残し交叉の対象となる．ここで，個体の適応度評価は各線列の適応関数の値によって行われ，制約条件がない場合の適応関数は目的関数を変換して作られる．この適応関数の変換方法は後で詳述するが，組合せ最適化で問題となる局所解に陥るのを防ぐことに関係する．ここで重要なことは，適応度の高い線列は複数残る（繁殖）可能性が高くなることであり，集団サイズは一定としているので，その結果適応度の低い線列は次世代に残らない（淘汰）可能性が高くなることである．

交叉プロセスは，適応度の高い2つの個体についてその線列を入れ換えるプロセスである．前世代から選ばれた複数の線列（交配プールに入った線列）からランダムに交叉する2つの線列を決める．この組において，線列の分断箇所を一様乱数（整数列）を発生させて決め，線列の分断箇所から後半部を入れ換える等をとおして新しい線列を作成する．GAでは，前記の繁殖・淘汰により，適応関数の値の大きい線列が密度濃く次世代に残され，小さい線列は薄く残される．そして，交叉により新しい子線列が形成されることになる．基本的には，この2つのプロセスの繰り返しにより最適化が進められると考えられる．

次が突然変異のプロセスである．上記の繁殖・淘汰と交叉の繰り返しでは，ある位置の線列の値が同じものとなり，限られた線列しか生成されなくなる場合が起こるため，これを避ける方法として低い確率で線列に突然変異を発生させるのがこのプロセスである．具体的には，突然変異を起こすか否かを確率により検討し，その線列が決まると，線列のどの位置の文字（遺伝子）を変えるかを一様乱数によりランダムに選び，機械的に文字を入れ換える．

GAでは以上のプロセスの繰り返しとなるが，この繰り返しの打ち切り基準（収束条件）は，一般に以下の3つの条件を当てはめることが多い．それは，①適応関数の値が以降の数世代において更新されないとき，②適応関数値の低い線列が集団サイズの多くを占めたとき，③世代が任意に決めた最大世代数を超えたときである．

以上のプロセスを持つGAの特徴としては，次の2点を挙げることができる．

① 通常の最適化手法では，逐次改善法にせよ構成的手法にせよひとつの解の候補を対象とする探索であるのに対して，GAは逐次改善法の一種ではあるが，解候補の集団を考え，その集団に生物進化の法則を適用することにより，最適解を得ようとする手法である[13].

② 組合せ最適化で最も問題となる局所解へ捕らわれることについては，GAでは各個体の適応度に基づく確

率的なプロセスで回避する．適応度の低い個体であっても「選択」される可能性を許容するという点において，焼きなまし法に類似している[14]．

これらの特徴により一般に最適解探索の計算時間が短くて済むことが報告されているが，GAの挙動を知る手がかりを与える理論的研究はあまり進んでいないとされている[15]．

本研究は，上記のGAを道路整備順位決定問題に当てはめることを目的とするが，この問題設定のフレームを説明すると以下の2点にまとめられる．

① 道路網整備のための予算制約のもとで，「ある期間における利用者のトリップ費用を道路網全体で集計した総走行時間」を「その期間に投入した整備費用」で割った「値（費用便益比）」を目的関数とする，

② OD交通量は所与のものすなわち，期間中のOD交通量の変動はないものとし，計画変数を離散変数として扱う．

## 3. GAの道路整備順位決定問題への定式化

### （1） 最適化問題の定式化

道路整備の順番を決定するにあたり，道路区間（リンク）を整備の基本単位とし，整備の順番について組合せ最適化を図る．この際，整備についての前提条件は次のとおりとする．

① 整備内容として，既存道路の改良と道路の新設を考える（新設については5章の応用事例で示す），

② 道路区間整備に要する期間はどの区間も1年とする，

③ 1年間に使用できる整備費用はどの年も一定とし，予算の範囲内であれば1年に複数区間の整備が可能とする，

④ 整備費用の繰越は行わない，

⑤ 道路区間ごとの整備内容（整備による $Q-V$ 曲線の変化と整備費用）は与件とする．

なお，前提条件の④については，費用の繰越を認めてGAを解くことも可能であるが，ここでは問題の単純化のためにこの前提条件を設けた．

分析においては，OD交通量は変化しないこととし，ネットワークへの交通量配分を最短経路への分割配分法で行うこととする．目的関数（$F$）は，以下のとおりであり，この最大化を図った．

$$F=\sum_{k=1}^{n}\{(\text{整備以前の走行時間費用})-(k\text{年度の走行時間費用})\}/(\text{総整備費用})$$

ただし，$\text{走行時間費用}=\sum_{ij}\{(ij\text{リンクの所要時間})\times(ij\text{リンクの年交通量})\times(\text{時間費用})\}$，

時間費用は1 800円／時・台，

$k$は整備期間（1～$n$）とした．

また，本研究のGAでは，制約条件を明示的に設定していない．この理由は，後述するが，ここで扱う制約条件の場合，設計変数の与え方で簡単に対応できるからである．このことは，確率的近似解法であるGAの1つの特徴と言え，期間内の工事の順位を任意決定し，その順位に応じて各工事が予算制約内か否かの判断をして行けば良いからである．

### （2） GAの定式化

ここでは，本研究のGAへの定式化を，(a) 設計変数のコーディング，(b) 適応関数と繁殖・淘汰，(c) 交叉，(d) 突然変異，(e) 収束条件の順に説明する．

#### a） 設計変数のコーディング

本研究においては，工事箇所に通し番号をつけ，工事の順番を表し，それらの番号の一組の並びを線列とする．例えば，{2　8　5　4　1　6　3　7}

という線列は，最初に工事2を施工し，以下，8, 5, 4, 1, 6, 3, 7（これらの個々の数字をビットという）という順に工事が行われることを意味する．

設定した線列の長さは，想定される工事箇所分だけ用意する．そして，線列の左側から予算制約を検討し，連続する2つの工事の工事費の和が，1年間の総予算の範囲内であれば，その2つの工事は同一年度内に施工するものとする．これは，先の制約条件の扱いを意味し，重要な点は，任意の線列毎に予算制約を検討することであり，ある予算制約内の2つの工事が見つかってもそれを固定的に扱わない点である．なお，GAにおいては，多数の線列を同時に扱う（その個数$N$を集団サイズという）が，GAによる最適化の初期には，ランダムにこの線列を発生させる．

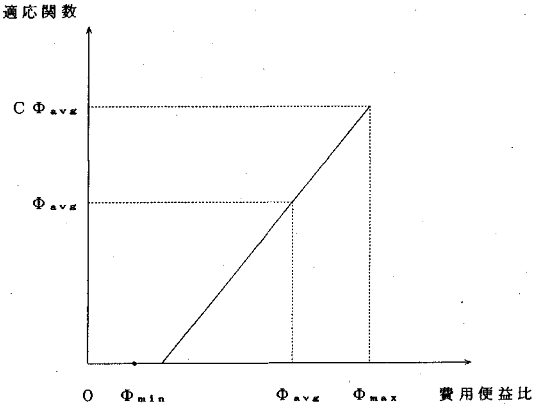
#### b） 適応関数と繁殖・淘汰

本研究は，費用便益比の最大化問題であるので，各線列に対応する費用便益比をそのまま適用関数とすることもできる．しかしそれでは，例えば最適化の初期には，適応関数の値がかなりばらつき，あるいは後期には，適応関数の値の差が小さくなることも考えられる．GAでは，適応関数の値のばらつきが大きいと，値の小さな線列が淘汰されやすくなり，これは最適化の初期には好ましくなく，また，ばらつきが小さいと淘汰が進まなくなり，これは最適化の後期にはまた好ましくない．そこで，費用便益比をそのまま使うことはせず，次式で適応関数に変換することにした．

$$F_i^{(t)}=\max(a\Phi_i^{(t)}-b,0)\qquad(i=1\sim N)\quad\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで，係数$a$, $b$は次式である．

$$a=\frac{\Phi_{\mathrm{avg}}(c-1)}{\Phi_{\max}-\Phi_{\mathrm{avg}}},\qquad b=\frac{\Phi_{\mathrm{avg}}(c\Phi_{\mathrm{avg}}-\Phi_{\max})}{\Phi_{\max}-\Phi_{\mathrm{avg}}}\quad\cdots\cdots\cdots(2)$$



図—1　費用便益比の適応関数への変換

$t$ は世代数，$\Phi_{avg}$，$\Phi_{max}$ は，それぞれ各世代における費用便益比の平均値及び最大値である．

式（1）の関数を示したのが図—1である．この適応関数により，$\Phi_{min}\sim\Phi_{max}$ の範囲の費用便益比（目的関数）を，$0\sim c\Phi_{avg}$ の範囲の適応関数に変換していることになる．

この式（1）の適応関数の値を用いて，次世代に残す $N$ 個の線列が決定され，この過程が繁殖・淘汰である．分析では，まず，$F_i(i=1\sim N)$ の平均値 $F_{avg}$ が計算され，適応関数の値が $F_{avg}$ より大きい線列は，その値に応じて優先的に残されることになる．線列 $i$ が次世代に優先的に残される数 $n_i$ は，次式で計算される．

$$n_i=\mathrm{INT}[F_i/F_{avg}] \qquad (i=1\sim N) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

ここで，INT[・]は，[　]内の実数値の小数点以下を切り捨てて整数化する関数である．適応関数の値 $F_i$ は，式（2）の $c$ の値によりコントロールされるが，以下に説明するように，$c$ の値が大きければ，最大の適応関数の値に対応する線列は多数残ることになる．

式（3）により，各線列が優先的に次世代に残る数が決定されるが，その総和は，一般的には $N$ よりも小さいので，残りの線列は確率的に決めることにする．各線列が次世代に残る確率は，次式で計算される $F_i(i=1\sim N)$ の相対的な関係により計算される．

$$\overline{F_i}=F_i-n_iF_{avy} \qquad (i=1\sim N) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

0~1の間を，$\overline{F_i}(i=1\sim N)$ の値に応じて比例配分し，次に[0, 1）の一様乱数を発生して，ひとつずつ線列が選ばれることになる．このとき，一度選ばれた線列の $\overline{F_i}$ の値は0にされる．

以上により，繁殖された新しい線列集合が作成され，次の交叉の手続きに移ることになる．

c）交　叉

交叉では，まず2つの線列（親線列）が任意に選ばれこれらの親線列間でビットを交換して新しい子線列が形成されることになる．本研究では，以下に説明する2種類の交叉法を検討した．

・交叉法1：この方法は，まず，親線列の切断箇所を任意に決め，子は，親の切断箇所の左右のビットの個数の多い方をまず受け継ぐことにする．次に，親の左側を受け継いだ子は，他方の親の左から順に見ていき，重複しない数字を左から順に入れていく．また，右を受け継いだ子は，他方の親の右から順に見ていき，やはり重複しない数字を右から入れるという方法である．

例えば，親線列が，

親A：2　8　5　4　1 ‖ 6　3　7
親B：7　4　6　3　8 ‖ 1　2　5　…………（5）

であり，切断箇所が，上に示すように左から5番目だった場合，子線列は次のようになる．

子A：2　8　5　4　1　7　6　3
子B：7　4　6　3　8　2　5　1　…………（6）

・交叉法2：この方法では，まず，工事の番号と同じ数字から構成される標準リストを任意に作成する．次に親線列の切断箇所を任意に決め，左のビットの数だけ多ければ左から，右が多ければ右から，親線列と標準リストとを対照させ，親線列の数字が，標準リストにある順番を，同じ方向から並べる．これを参照リストとする．この時，1度選ばれた数字は，標準リストから削除される．この参照リストを，先に決めてある切断箇所で1点交叉し，新しくできた参照リストから，今度は上と逆の手順で子線列を作成する．例えば親線列が，上例の式（5）で，切断箇所がやはり左から5番目，標準リストが次式の場合を例に取ると以下のようになる．

標準リスト：[1　2　3　4　5　6　7　8]

切断箇所が左から5番目で，左のビットの個数が多いから，左から親線列と標準リストを対照させると，参照リストは以下のように得られる．

参照リストA：[2　7　4　3　1　2　1　1]
参照リストB：[7　4　5　3　4　1　1　1]

左から5番目で切断し，1点交叉して得られる新しい参照リストは，

参照リストA：[2　7　4　3　1　1　1　1]
参照リストB：[7　4　5　3　4　2　1　1]

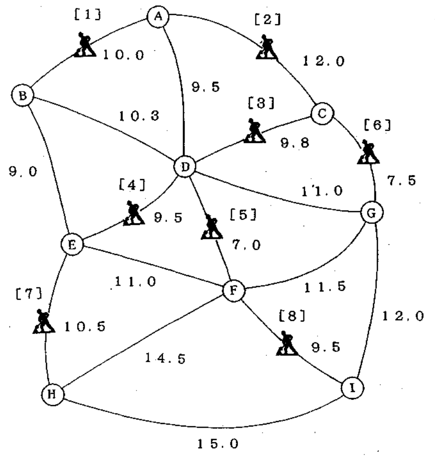
このそれぞれの参照リストと標準リストを左から対照されて，新しい子線列が以下のように形成される．

子A：2　8　5　4　1　3　6　7
子B：7　4　6　3　8　2　1　5

以上の交叉法いずれにおいても，2つの親線列が任意に選択された後に，交叉は必ず行われるわけではなく，あらかじめ与えた交叉確率 $P_c$ で行われることになる．

d）突然変異

本研究では，切断箇所を任意に2箇所決め，その切断箇所の間の数字の並びを入れ替える（突然変異1）もの




図—2　分析対象ネットワーク（厳密解法用）

表—1　ネットワークの OD 表

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | | | | | | | | |
| B | 60 | | | | | | | | |
| C | 50 | 75 | | | | | | | |
| D | 20 | 35 | 70 | | | | | | |
| E | 40 | 40 | 50 | 35 | | | | | |
| F | 55 | 50 | 40 | 90 | 25 | | | | |
| G | 70 | 30 | 80 | 45 | 15 | 50 | | | |
| H | 45 | 60 | 100 | 55 | 40 | 70 | 40 | | |
| I | 30 | 65 | 80 | 85 | 30 | 75 | 20 | 55 | |
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |

（×１００台／日）

と，2つのビットを任意に選択し，そのビット同士のみを入れ替える（突然変異 2）ものの 2 つの方法を検討した．

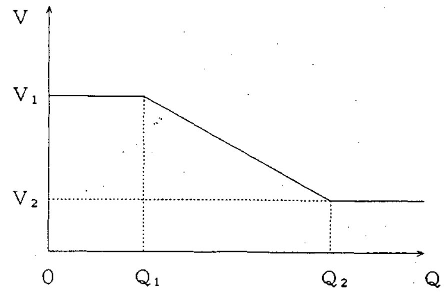
また，数世代最適化が進んだ後，目的関数（費用便益比）の改善が得られないことがある．これは，収束とも考えられるが，初期収束の恐れもある．そこで，初期には，突然変異の確率を集団サイズ分の 1 と比較的低く設定しておくが，ある条件を満足したら突然変異の確率を 50% に上げることも試みた．この方法を B とし，しない方法を A として，上記の突然変異 1，2 と組み合わせて検討を加えた．

本研究では，最も良い線列の数が，集団サイズの 1 割に達したら，突然変異の確率を上げた．

e）収束条件

GA においては，必ずしもすべての線列が同じ組み合わせになるまで計算を進める必要はなく，ある時点で計算を終了し，さかのぼって最良の組み合わせを捜すのが良いと考えられる．本論文では以下の条件のいずれかを満足したら計算を終了させた．

・最大世代数（経験から 50 世代と設定）に達した場合．




図—3　想定した $Q-V$ 曲線

・すべての線列が同じになった場合．

・費用便益比の最大値が以降の 20 世代で更新されない場合．

## 4. 厳密解法と GA の比較

（9 ノード，17 リンク，8 工事区間への適用）

本研究では，まず GA による解の妥当性を明らかにするため，比較的小規模の道路ネットワークを対象として，厳密解法と GA の解を比較することとした．

対象とする道路ネットワークは，図—2 に示す 9 ノード，17 リンクのネットワークであり，この上に 8 工事区間を想定し，これらの工事順位を決定するという問題設定である．分析を行う上での諸条件として，まず，各ゾーン間の OD 表を表—1 に示す．次に，交通量と速度は図—3 に示す関係にあると仮定し，$Q_1$，$Q_2$，$V_1$，$V_2$ の値（$Q-V$ 係数）を工事前，工事中，工事後それぞれについて，各ルート毎に所与とした．各ゾーン間の距離及び工事前の $Q-V$ 係数を表—2 に，各工事区間の工事費，工事中及び改良された後の $Q-V$ 係数を表—3 に示した．OD 表の交通量，および表—2，3 の $Q$ の単位は 100 台／日である．表—3 の工事費は，一定値あるいは $Y$ に関する線形増加関数として与えているが，$Y$ は初年度からの経過年数である．また，予算は，年 18 億円，配分計算における等分割数は 10，費用便益比を積算する年数は 10 年としている．

GA の解探索を調べるため，交叉法は 2 種類設定し，それぞれ交叉確率が 60% の場合と 75% の場合とした．また，突然変異は $A$，$B$ それぞれにおいて 2 種類のすべての組み合わせ 16 ケースを計算した．

以上の分析結果を表—4 に示した．表中，工事の順位の欄で，＋で結ばれた工事は，同一年度内に施工されることを意味する．世代の欄における左の数字は，最大の費用便益比が最初に現れた世代数，右の数字は終了した世代数である．処理時間は，計算に要した計算時間で，コンピュータは，VAX-ステーション-3100 を用いた．なお，式（2）の $c$ の値は，1.5 と 2.5 の二通りの計算を行ったが，結果にほとんど差がなかったので，表—4

表—2　工事前の $Q-V$ 係数

| ルート | 距離 | 工事前の係数 | | | | ルート | 距離 | 工事前の係数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ | | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ |
| A－B | 10.0 | 50 | 400 | 45 | 10 | D－F | 7.0 | 60 | 400 | 30 | 5 |
| A－C | 12.0 | 60 | 400 | 40 | 10 | D－G | 11.0 | 70 | 350 | 50 | 15 |
| A－D | 9.5 | 70 | 400 | 50 | 20 | E－F | 11.0 | 80 | 400 | 50 | 20 |
| B－D | 10.3 | 80 | 400 | 50 | 15 | E－H | 10.5 | 50 | 400 | 50 | 15 |
| B－E | 9.0 | 70 | 400 | 50 | 25 | F－G | 11.5 | 60 | 400 | 40 | 10 |
| C－D | 9.8 | 50 | 350 | 40 | 15 | F－H | 14.5 | 70 | 400 | 50 | 15 |
| C－G | 7.5 | 70 | 350 | 50 | 15 | F－I | 9.5 | 80 | 400 | 55 | 20 |
| D－E | 9.5 | 60 | 300 | 40 | 15 | H－I | 15.0 | 50 | 350 | 45 | 15 |

（$Q_1$，$Q_2$：×１００）

表—3　工事中，工事後の $Q-V$ 係数と工事費用

| 工事番号 | ルート | 工事費 $(\times10^{6})$ | 工事中の係数 | | | | 工事後の係数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ |
| 1 | A－B | 75Y+750 | 40 | 100 | 30 | 5 | 140 | 450 | 60 | 30 |
| 2 | A－C | 84Y+720 | 40 | 100 | 30 | 5 | 120 | 450 | 65 | 30 |
| 3 | C－D | 98Y+980 | 35 | 100 | 35 | 5 | 100 | 500 | 60 | 30 |
| 4 | D－E | 1377.5 | 40 | 150 | 25 | 10 | 120 | 500 | 60 | 30 |
| 5 | D－F | 1700 | − | − | 0 | 0 | 140 | 450 | 55 | 40 |
| 6 | C－G | 135Y+675 | 50 | 150 | 40 | 10 | 100 | 500 | 60 | 35 |
| 7 | E－H | 168Y+210 | 35 | 100 | 30 | 8 | 120 | 500 | 60 | 30 |
| 8 | F－I | 8.1Y+1377.5 | 20 | 100 | 30 | 6 | 125 | 450 | 65 | 25 |

（Q1，Q2：×１００）

表—4　GA 及び厳密解（列挙法）の結果

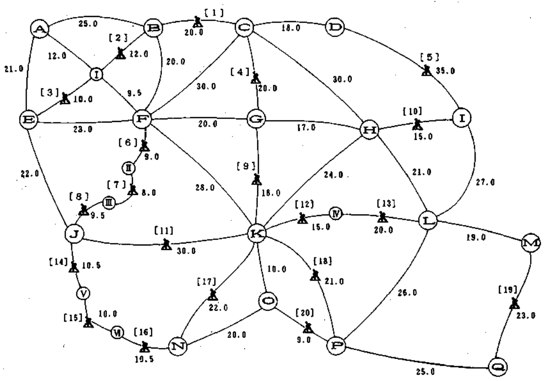
| 交叉法 | 交叉確率 | 突然変異 | | 工事の順序 | 費用便益比 | 世代 | 処理回数 | 処理時間 (min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 60％ | A | 1 | 6+2　3+7　4　5　1　8 | 13.204 | 6/21 | 237 | 2.0 |
| | | | 2 | 2+6　7+3　4　5　1　8 | 13.204 | 6/21 | 202 | 1.7 |
| | 75％ | | 1 | 6+2　7+3　5　8　4　1 | 13.227 | 10/25 | 277 | 2.3 |
| | | | 2 | 2+6　7+3　5　4　8　1 | 13.186 | 3/18 | 241 | 2.1 |
| | 60％ | B | 1 | 6+2　7+3　4　5　8　1 | 13.246* | 13/28 | 386 | 3.2 |
| | | | 2 | 6+2　7+3　4　5　8　1 | 13.246* | 20/30 | 474 | 3.9 |
| | 75％ | | 1 | 6+2　7+3　4　5　8　1 | 13.246* | 18/30 | 412 | 3.4 |
| | | | 2 | 2+6　7+3　5　4　8　1 | 13.186 | 3/18 | 241 | 2.1 |
| 2 | 60％ | A | 1 | 2+6　3+7　4　5　8　1 | 13.246* | 15/30 | 250 | 2.1 |
| | | | 2 | 2+6　1+7　5　8　3　4 | 13.178 | 5/20 | 294 | 2.6 |
| | 75％ | | 1 | 2+6　3+7　5　8　4　1 | 13.227 | 15/30 | 371 | 3.3 |
| | | | 2 | 2+6　5　7+1　8　3　4 | 13.078 | 6/21 | 245 | 2.1 |
| | 60％ | B | 1 | 6+2　7+3　4　5　8　1 | 13.246* | 12/27 | 506 | 4.3 |
| | | | 2 | 2+6　7+3　5　8　4　1 | 13.227 | 26/30 | 381 | 3.1 |
| | 75％ | | 1 | 6+2　7+3　5　8　4　1 | 13.227 | 8/23 | 352 | 2.9 |
| | | | 2 | 2+6　3+7　4　5　8　1 | 13.246* | 19/30 | 466 | 3.8 |
| 列挙法 | | | | 2+6　3+7　4　5　8　1 | 13.246 | | | 365 |

には $c$ の値が 1.5 の場合のみを示した．また，この問題は，8 工事区間であるので，それらのすべての組み合わせの数は，40 320 であり列挙法で解を検証することは可能である．その結果も表—4 の最下欄に示した．

列挙法による結果と GA による結果を比較すると，GA による結果は，16 ケースのうち 6 ケースで真の解が得られており，突然変異 $B$ に限定すれば，8 ケースの内 5 ケースで真の解が得られることになる．また，最低の費用便益比の値でも，真の解との誤差は 1% 程度であることが分かる．この分析により，GA の解は厳密解と比較してほぼ妥当な解を探索していると判断できる．

## 5.　GA の応用例

（17 ノード，41 リンク，20 工事区間への適用）




図—4　分析対象ネットワーク（応用例）

前章では，厳密解が計算できる問題に GA を適用し解の妥当性を検討したが，ここでは，比較的大規模な問題に応用して，ランダムサーチの結果との比較を行い，GA の有効性と妥当性について検討する．

### （1）　3 ケースの問題の説明

ここで検討する道路ネットワークは，図—4 に示す 17 ノード，41 リンクのネットワークであり，この上に 20 工事区間を想定し，これらの工事順位を決定するという問題設定である．分析を行う上での諸条件として，まず，各ゾーン間の OD 表を表—5 に，各ゾーン間の距離及び工事前の $Q-V$ 係数を表—6 に示した．なお，$Q-V$ 係数は先の図—3 の仮定による値である．

ここで，ルート $J-K$ と $M-Q$ は新設工事である．GA では線列により改良・新設の順番が示され（本研究では，線列を構成するビットを工事箇所としているため，改良も新設も同様の工事箇所として扱う），それに対応して交通量の配分を行って行くため，道路新設工事も容易に扱うことができるのが特徴の一つである．

各工事区間の工事費，工事中及び改良された後の $Q-V$ 係数を表—7 に示した．ケース 1 は基準ケースとして任意に設定した問題である．ケース 2 は，ケース 1 の工事費の設定を若干変えてある．網掛をした部分が，工事費を変更した工事であるが，特に工事番号 1，2，5，10 において，$Y$ の係数を大きくし，年度が進むと工事費が大きくなるようにしている．ケース 3 は，ケース 1 の工事後の $Q-V$ 係数を変えた例である．ケース 2 と同様に，網掛をした部分が変更した工事であるが，工事番号 1，2，3，14，15，16 で走行速度を早くし，工事番号 9，11，12，13，17，18 で遅く変更している．

これらのパラメータの変更に対する GA の結果の変化も，GA の妥当性を検討する上で必要と考えられたので，これらの問題の設定を試みた．

### （2）　計算結果の説明

GA の応用に際しては，突然変異 $B$ のみを考え，各ケース毎に 8 種類の計算を行った．結果を表—8 に示し

表―5　ネットワークのOD表（応用例）

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | 52 | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | 37 | 45 | | | | | | | | | | | | | | |
| D | 49 | 38 | 13 | | | | | | | | | | | | | |
| E | 48 | 23 | 40 | 60 | | | | | | | | | | | | |
| F | 50 | 47 | 57 | 43 | 38 | | | | | | | | | | | |
| G | 29 | 31 | 38 | 22 | 33 | 30 | | | | | | | | | | |
| H | 60 | 50 | 31 | 36 | 65 | 39 | 23 | | | | | | | | | |
| I | 42 | 28 | 47 | 24 | 33 | 29 | 42 | 36 | | | | | | | | |
| J | 39 | 25 | 58 | 38 | 28 | 41 | 48 | 32 | 24 | | | | | | | |
| K | 35 | 39 | 45 | 29 | 40 | 31 | 65 | 37 | 40 | 58 | | | | | | |
| L | 26 | 23 | 41 | 40 | 47 | 65 | 50 | 39 | 52 | 31 | 50 | | | | | |
| M | 33 | 30 | 42 | 40 | 59 | 34 | 23 | 40 | 40 | 39 | 35 | 24 | | | | |
| N | 27 | 40 | 54 | 39 | 55 | 40 | 48 | 26 | 58 | 57 | 28 | 38 | 48 | | | |
| O | 44 | 37 | 29 | 41 | 38 | 38 | 26 | 50 | 50 | 22 | 45 | 31 | 27 | 54 | | |
| P | 23 | 31 | 22 | 35 | 27 | 20 | 43 | 31 | 32 | 29 | 30 | 45 | 38 | 27 | 50 | |
| Q | 25 | 31 | 35 | 36 | 8 | 5 | 25 | 9 | 31 | 18 | 10 | 2 | 30 | 40 | 11 | 22 |
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q |

（×100台／日）

表―6　工事前の $Q-V$ 係数（応用例）

| ルート | 距離 | 工事前の係数 | | | | ルート | 距離 | 工事前の係数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ | | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ |
| A−B | 25.0 | 70 | 400 | 50 | 15 | G−K | 18.0 | 50 | 400 | 40 | 5 |
| A−E | 21.0 | 100 | 400 | 50 | 10 | H−I | 15.0 | 50 | 400 | 40 | 5 |
| A−F | 21.5 | 70 | 400 | 50 | 10 | H−K | 24.0 | 60 | 400 | 50 | 10 |
| B−C | 20.0 | 40 | 400 | 45 | 15 | H−L | 21.0 | 100 | 400 | 50 | 5 |
| B−E | 22.0 | 50 | 400 | 40 | 5 | I−L | 27.0 | 90 | 400 | 50 | 10 |
| B−F | 20.0 | 80 | 400 | 50 | 10 | J−K | 30.0 | 新設 | | | |
| C−D | 18.0 | 70 | 400 | 50 | 15 | J−N | 31.0 | 50 | 400 | 35 | 5 |
| C−F | 30.0 | 80 | 400 | 50 | 10 | K−L | 35.0 | 50 | 400 | 35 | 5 |
| C−G | 20.0 | 40 | 400 | 40 | 5 | K−N | 22.0 | 60 | 400 | 30 | 5 |
| C−H | 30.0 | 70 | 400 | 55 | 10 | K−O | 10.0 | 90 | 450 | 50 | 10 |
| D−I | 35.0 | 50 | 400 | 45 | 10 | K−P | 21.0 | 50 | 400 | 30 | 5 |
| E−F | 23.0 | 80 | 400 | 50 | 10 | L−P | 26.0 | 80 | 400 | 50 | 10 |
| E−J | 22.0 | 95 | 400 | 50 | 10 | L−M | 19.0 | 100 | 400 | 55 | 10 |
| F−G | 20.0 | 100 | 400 | 45 | 10 | M−Q | 23.0 | 新設 | | | |
| F−J | 26.5 | 60 | 400 | 40 | 5 | N−O | 20.0 | 100 | 450 | 50 | 10 |
| F−K | 28.0 | 100 | 400 | 50 | 10 | O−P | 9.0 | 50 | 400 | 40 | 15 |
| G−H | 17.0 | 80 | 400 | 50 | 10 | P−Q | 25.0 | 100 | 400 | 40 | 10 |

（$Q_1$、$Q_2$：×100）

表―7　工事中，工事後の $Q-V$ 係数と工事費用（応用例）

| | | | ケース1 | | | | | | | | | ケース2 | ケース3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 工事番号 | ルート | 距離 | 工事費（×10⁶） | 工事中の係数 | | | | 工事後の係数 | | | | 工事費（×10⁶） | 工事後の係数 | | | |
| | | | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ | | $Q_1$ | $Q_2$ | $V_1$ | $V_2$ |
| 1 | B−C | 20.0 | 10Y+400 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | 30Y+400 | 100 | 500 | 70 | 15 |
| 2 | B−I | 12.0 | 15Y+500 | 30 | 400 | 25 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | 20Y+500 | 100 | 500 | 70 | 15 |
| 3 | I−E | 10.0 | $\frac{40}{3}$Y+500 | 30 | 400 | 25 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | $\frac{40}{3}$Y+500 | 100 | 500 | 70 | 15 |
| 4 | C−G | 20.0 | 5Y+750 | 20 | 400 | 20 | 1 | 80 | 500 | 60 | 10 | 5Y+750 | 80 | 500 | 60 | 10 |
| 5 | D−I | 35.0 | 600 | 30 | 400 | 30 | 5 | 80 | 500 | 50 | 10 | 40Y+200 | 80 | 500 | 50 | 10 |
| 6 | F−Ⅱ | 9.0 | 30Y+270 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | 30Y+270 | 100 | 500 | 60 | 15 |
| 7 | Ⅱ−Ⅲ | 8.0 | 10Y+600 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | 10Y+600 | 100 | 500 | 60 | 15 |
| 8 | Ⅲ−J | 9.5 | 700 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | 700 | 100 | 500 | 60 | 15 |
| 9 | G−K | 18.0 | Y+900 | 30 | 400 | 40 | 5 | 100 | 500 | 60 | 15 | Y+900 | 60 | 500 | 45 | 5 |
| 10 | H−I | 15.0 | 5Y+475 | 35 | 400 | 30 | 5 | 80 | 500 | 55 | 10 | 30Y+380 | 80 | 500 | 55 | 10 |
| 11 | J−K | 30.0 | 2Y+920 | 新設 | | | | 100 | 500 | 65 | 20 | 990 | 60 | 500 | 45 | 5 |
| 12 | K−Ⅳ | 15.0 | 500 | 40 | 400 | 30 | 5 | 80 | 500 | 60 | 20 | 500 | 80 | 500 | 40 | 5 |
| 13 | Ⅳ−L | 20.0 | 10Y+450 | 40 | 400 | 30 | 5 | 80 | 500 | 60 | 20 | 10Y+500 | 80 | 500 | 40 | 5 |
| 14 | J−Ⅴ | 10.5 | 2Y+488 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 50 | 10 | 2Y+488 | 100 | 600 | 70 | 25 |
| 15 | Ⅴ−Ⅵ | 10.0 | 2Y+488 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 50 | 10 | 2Y+488 | 100 | 600 | 70 | 25 |
| 16 | Ⅵ−N | 10.5 | 2Y+488 | 40 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 50 | 10 | 2Y+488 | 100 | 600 | 70 | 25 |
| 17 | K−N | 22.0 | 600 | 35 | 400 | 25 | 3 | 90 | 500 | 50 | 10 | 600 | 90 | 500 | 40 | 5 |
| 18 | K−P | 21.0 | Y+509 | 40 | 400 | 20 | 3 | 80 | 500 | 55 | 15 | Y+509 | 80 | 500 | 40 | 5 |
| 19 | M−Q | 23.0 | 900 | 新設 | | | | 90 | 500 | 60 | 20 | 950 | 90 | 500 | 60 | 20 |
| 20 | O−P | 9.0 | 10Y+540 | 50 | 400 | 30 | 5 | 100 | 500 | 50 | 15 | 10Y+540 | 100 | 500 | 50 | 15 |

た．費用便益比の欄で右肩に＊がついているのが，各ケースにおける最大の費用便益比の値である．これらの最大の費用便益比を与えた工事順位を図に示したのが，図―5~7である．図中の（　）内に示してある数字（図―4の工事箇所に対応）が，その工事が行われる年度を示している．図の破線は新設工事である．

（3）　結果の考察

まず，ケース1，2，3の間で，問題の変更に対する工事順位の変化を考察してみる．

ケース2では，工事番号1，2，5，10において，$Y$の係数を大きくし，年度が進むと工事費が大きくなるように設定した．年度ごとの交通量の変化とも関連し単純には結論づけれないが，一般的には，年度が進むと費用が高くなる工事は早い年度の内に終了した方が良い．結果を比較すると，工事費の設定を変えたこれらの工事は，ケース1では13，17，10，3年度だったのが，ケース2では，3，8，4，3年度といずれも同じかなり早くなっている．

ケース3は，工事終了後の走行速度を変えた例題である．変え方は，CB区間，BE区間およびJN区間の走行速度を早くし，逆に，GK区間，JKL区間，NK区間，およびPK区間と，ゾーンKに連結するルートの速度を遅くしている．

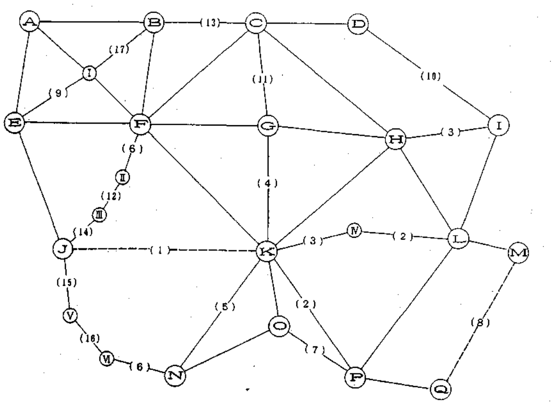
図―5と図―7を比較すると，CB区間が13年度から8年度，BE区間はほとんど同じ，JN区間は16年度から5年度と早く工事が行われ，GK区間は4年度から7年度，JK区間は同じ，LK区間は3年度から5年度，NK区間は5年度から12年度，PK区間は2年度から9年度と，いずれも同じかかなり遅くなっている．

これらの結果から，GAによる解は，問題の設定に敏感に反応しており，妥当ではないかと考えられる．

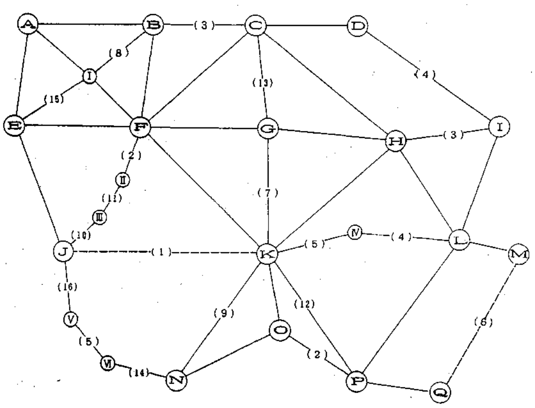
この問題は，工事区間が20あるので，すべての組み合わせ数は20の階乗となり，列挙法による計算は不可能である．そこで，ランダムサーチを行い，結果を比較

表—8　GA の分析結果（応用例）

| ケース | 交叉法 | 交叉確率 | 突然変異 | | 工事の順序 | 費用便益比 | 世代 | 処理回数 | 処理時間 (min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 60 % | B | 1 | 11 12+13 9 6+18 2 15 1 19 3 7 20 17 4 16 8 14 5 10 | 933.54 | 48/50 | 920 | 51.6 |
| | | | | 2 | 11 9 6+18 12+13 17 10 20 3 19 16 4 7 1 8 15 5 14 2 | 945.86 | 48/50 | 1041 | 58.7 |
| | | 75 % | | 1 | 11 6+18 12+13 9 17 10 7 3 19 20 16 5 1 4 8 14 2 15 | 950.51 | 47/50 | 1262 | 71.5 |
| | | | | 2 | 11 18+13 10+12 9 17 6+16 20 19 3 5 4 7 1 8 14 15 2 | 956.72* | 46/50 | 1062 | 59.5 |
| | 2 | 60 % | B | 1 | 11 13+18 12+ 6 9 4 16 17 20 19 7 2 1 8 15 3 14 10 5 | 929.00 | 38/50 | 826 | 46.5 |
| | | | | 2 | 11 9 17+ 6 12+13 10 18 16 20 19 3 7 1 8 4 15 14 5 2 | 938.59 | 48/50 | 740 | 41.8 |
| | | 75 % | | 1 | 11 9 18+13 12 4 17 6+16 20 5 19 7 8 1 19 14 15 3 2 | 929.23 | 44/50 | 1401 | 78.4 |
| | | | | 2 | 11 18+13 12 9 4 17 6+16 20 5 10 15 1 7 8 19 14 3 2 | 926.07 | 49/50 | 962 | 54.1 |
| 2 | 1 | 60 % | B | 1 | 10+ 5+ 6 11 15+12 1 13 7 9 18 19 2 20 17 8 4 16 14 3 | 934.92 | 47/50 | 1204 | 64.1 |
| | | | | 2 | 11 6+ 2 12+ 1 10+15 5+13 19 9 8 20 7 4 16 14 18 17 3 | 928.65 | 48/50 | 973 | 52.3 |
| | | 75 % | | 1 | 11 6+10 5+ 2 15+12 13 9 19 20 1 18 17 8 4 7 14 16 3 | 915.68 | 50/50 | 984 | 52.9 |
| | | | | 2 | 11 6+20 1+10 5+13 12+15 19 9 2 17 8 7 18 4 16 3 14 | 936.52* | 47/50 | 1232 | 67.0 |
| | 2 | 60 % | B | 1 | 10+ 6+ 5 11 2 18 17 13 4 9 8 19 1 12 20 16 7 15 14 3 | 882.46 | 41/50 | 878 | 47.4 |
| | | | | 2 | 6+ 5+10 11 2 9 15+12 8 19 1 13 20 17 4 18 7 14 16 3 | 902.59 | 48/50 | 1196 | 63.7 |
| | | 75 % | | 1 | 11 2+10 6+ 1 15+12 20+ 5 19 13 8 9 17 18 4 7 16 3 14 | 906.62 | 47/50 | 1525 | 82.5 |
| | | | | 2 | 10+ 6+ 5 11 1+15 9 2 20 19 13 12 4 18 7 17 8 14 3 16 | 917.49 | 47/50 | 1676 | 62.0 |
| 3 | 1 | 60 % | B | 1 | 16+15 3+13 11 6+12 20 9 17 14 2 19 10 18 7 8 5 4 1 | 746.64 | 48/50 | 924 | 50.3 |
| | | | | 2 | 11 16+15 14+13 6+ 5 4 19 17 20 18 2 1 7 8 9 12 10 3 | 740.68 | 47/50 | 1150 | 62.9 |
| | | 75 % | | 1 | 11 6+18 15+12 13+14 16 4 3 9 17 7 10 2 8 20 19 5 1 | 732.36 | 46/50 | 1211 | 66.8 |
| | | | | 2 | 11 15+13 6+16 14+12 7 19 17 8 18 9 5 20 2 1 10 4 3 | 751.40 | 48/50 | 1101 | 59.5 |
| | 2 | 60 % | B | 1 | 11 20+ 6 12+13 14+10 9 2 15 8 16 19 17 7 5 18 1 4 3 | 743.29 | 50/50 | 924 | 50.0 |
| | | | | 2 | 15+14 10+13 6+ 3 19 20 1 11 18 7 9 16 8 17 12 5 4 2 | 727.15 | 48/50 | 1113 | 61.0 |
| | | 75 % | | 1 | 11 13+10 14+15 5 16+12 7 9 1 18 8 6 17 20 19 2 4 3 | 751.49* | 50/50 | 1403 | 76.8 |
| | | | | 2 | 15+16 6+ 5 14+13 11 20 19 17 8 7 12 4 9 18 1 2 10 3 | 744.57 | 39/50 | 955 | 52.0 |



図—5　ケース１の工事順位



図—6　ケース２の工事順位

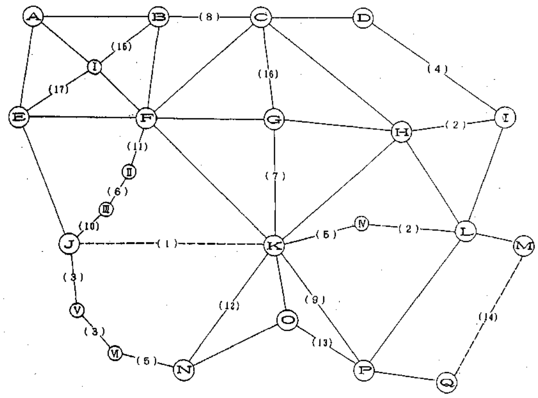
した．計算結果を図—8～10 に示した．図は，横軸が費用便益比の値であり，縦軸が，それぞれ 1 000 回，5 000 回，および 10 000 回発生させた場合の頻度分布である．横軸上に GA の結果を◎で，ランダムサーチによる結果を▽（1 000 回），△（5 000 回），○（10 000 回）で示してある．いずれのケースでも，GA の結果は 10 000 回ランダムに発生した場合よりもよい結果を与えている．

また，計算の処理時間は，ランダムサーチで 1 000 回の場合が約 57 分，10 000 回が約 9 時間 30 分であるのに対し，GA の場合は約 60 分（表—8）でより良好な解が得られていることが分かる．

以上より，GA は，実用上問題のない範囲で妥当な解を出していると考えられる．

（4）　交叉法と突然変異について

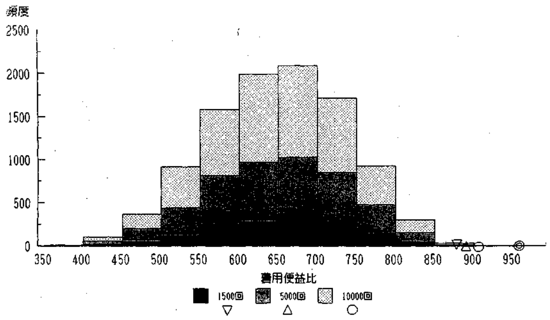
表—8 に示すように，各ケース毎に 8 種類の計算を



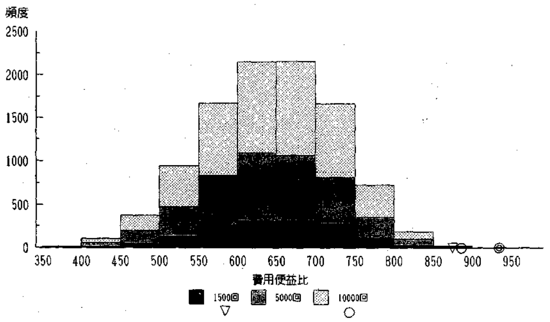
図—7　ケース３の工事順位

行ったが，ここでは，交叉法，交叉確率，および突然変異と費用便益比との関係について若干の考察を加える．

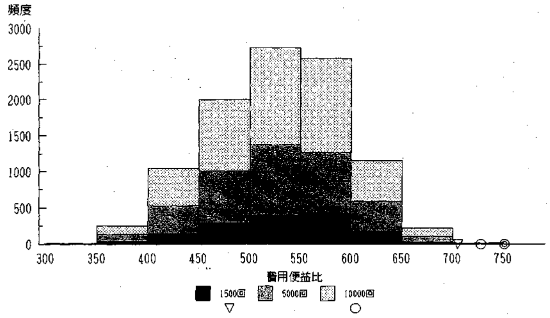
図—11 は，各手法の組み合わせを横軸に取り，各ケー



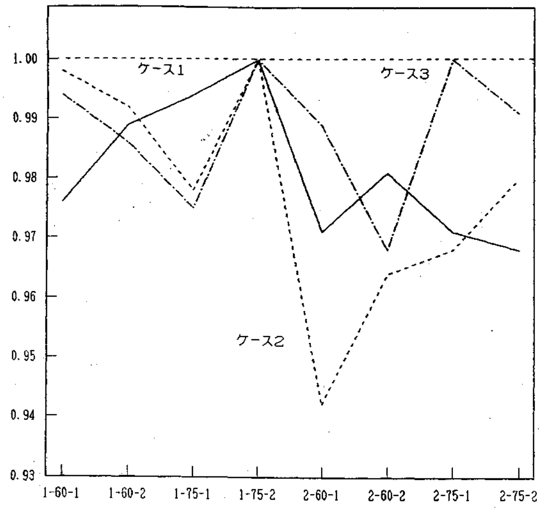

図—8　ケース 1 のランダムサーチと GA の結果



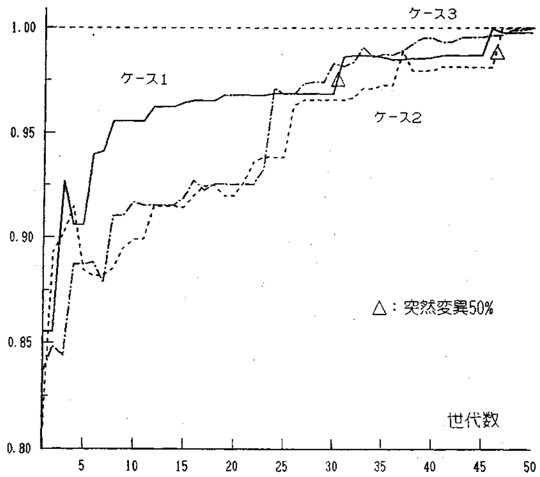

図—9　ケース 2 のランダムサーチと GA の結果




図—10　ケース 3 のランダムサーチと GA の結果




図—11　手法の組合せと費用便益比




図—12　突然変異 $B$ の効果

スにおいて最適な費用便益比の値（表—8 で＊をつけた値）を 1 とした場合の各費用便益比の値を縦軸に取った図である．横軸は，最初の数字が交叉法，次が交叉確率，最後が突然変異の種類を表す．ケースにより若干の差はあるが，この図からは，交叉法 1，交叉確率 75%，突然変異 2 の組み合わせが比較的良い解を与えていると考えられる．

また，図—12 は，突然変異 $B$ において，突然変異を行う確率を 50% に上げることの効果を検討した図である．縦軸は図—8 と同じ値，横軸は世代数を取っている．図中の△が，突然変異の確率が 50% に上げられた世代である．各ケース毎に，表—8 で最適の値を与えた場合を図にしている．ケース 3 では，突然変異を行う確率を上げる条件に達しなかったが，他のケース 1 と 2 では，突然変異の確率を 50% に上げた後に費用便益比の値が急上昇している傾向が見られる．これらより，本研究の突然変異 $B$ は有効ではないかと考えられる．

## 6.　おわりに

本研究は，遺伝的アルゴリズムを道路整備順位決定問題に適用したもので，厳密解法と解のランダムサーチとの比較から GA の有効性が確かめられた．特に，本研究で工夫した点と GA の特徴を生かせた点は以下のとおりである．

① 線列の設計変数として工事箇所を考え，その順番を GA により探索したこと，

② 制約条件である予算を線列を区切る形（予算制約の関係から線列の長さを決定するよう工夫した形）で設定することにより，GA の中に制約条件式を組み込まずに済んだこと．

③ 適用関数を設定し，解が局所解に陥ることを妨げたこと（但し，適応関数の設定については本研究で

は論究していない），

④ 従来の分析では解法が困難とされていた「路線新設を加えた整備順位決定問題」についても，GA では解法上問題が生じないことを具体的な例をもって示せたこと，

⑤ 以上の，工夫により解の精度をあまり犠牲にせず，GA の解探索時間を短縮できたことである．

本来 GA 手法はより複雑な離散型組合せ最適問題の解法に優れた方法であり，今回の分析対象は GA の能力を十分に生かしたものとは言えない．この点については，より大規模な実際の道路ネットワークへの適応へと発展させることが必要である．また，OD 交通量を所与しない需要変動型の問題への適用も重要であり，この場合は GA に内包するサブシステムを別途構築するなど，GA のシステム環境をどの様に設計するかの検討が必要となろう．これらは全て，今後の課題である．

## 参考文献

1） 吉崎　収：道路整備優先順位決定手法の検討，オペレーションズ・リサーチ，1985.
2） 森津秀夫：選好記録からの多属性効用関数の同定に関する研究，土木計画学研究・論文集，No. 4，1986.
3） 藤井敬宏・高田邦道：非幹線道路の整備優先順位の決定法，土木計画学研究・講演集，No. 10，1987.
4） 木下栄蔵：階層分析法による高速道路路線の建設優先順位決定に関する研究，交通工学，Vol. 26，No. 6，1991.
5） 清田　勝・高田　弘・樗木　武・田上　博：地方中小都市における住宅立地と道路網の整備に関する一考察，日本都市計画学会学術研究論文集，Vol. 20，1985.
6） 西村　昻・日野泰雄：最適ネットワーク構成に関する一考察，土木学会論文報告集，第 250 号，1976.
7） 清田　勝・高田　弘・樗木　武：ゴール・プログラミングによる都市道路網の有効利用と整備手法に関する研究，土木計画学研究・論文集，No. 3，1986.
8） 飯田恭敬・森津秀夫・朝倉康雄：交通ネットワークの最適計画手法の現況と課題，高速道路と自動車，Vol. 31，No. 3，1988.
9） 朝倉康雄：利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル，土木計画学研究・論文集，No. 6，1988.
10） Holland, J.H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. Michigan Press, 1975.
11） 岡部秀彦：Genetic Algorithm，日本ファジィ学会誌，Vol. 13，No. 4，1991.
12） 計測と制御「特集　遺伝的アルゴリズム」，Vol. 32，No. 1，1993.
13） 須貝康雄・平田広則：組合せ最適化アルゴリズムとその応用，計測と制御，Vol. 29，No. 12，1990.
14） 小林重信：遺伝的アルゴリズムの現状と展望，計測自動制御学会第 4 回知能工学部会講演会資料，1993.
15） 小林重信：遺伝的アルゴリズムの現状と課題，計測と制御，Vol. 32，No. 1，1993.

（1993. 6. 14　受付）

# APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO DETERMINING PRIORITY OF URBAN ROAD IMPROVEMENT

Tohru TAMURA, Hiroyuki SUGIMOTO and Takayuki KAMIMAE

Genetic Algorithms (GA) include generally three genetic operators, selection, crossover and mutation. The lack of dependence on function gradients makes it more suitable to such problems, like as discrete optimization design problems and optimization design problems with nonconvexities or disjointness in design space. The method is tried to apply to the determining priority of urban road improvement in this paper. The results suggest that GA is more effective for the optimization of large size road networks.