

## I-22

## GAによる橋梁の維持・補修工事の順序決定

室蘭工業大学 学生員 上前孝之、正員 杉本博之、学生員 山本洋敬

## 1. はじめに

道路は、1本では機能を果たさず、複雑なネットワークを形成して初めて機能するものである。1本の道路の状態の変化がネットワーク全体へと影響を及ぼすことになり、総合的な処理が必要となる。

北海道においては余り顕著にはなっていないが、戦前あるいは戦後すぐ架設した一連の橋梁群は、耐用度あるいはその後の交通量の激変により、補修あるいは架け替えの時期が迫ってきている。これらの橋梁もまた、当然道と道を結ぶネットワーク上重要な位置にあり、それらの補修あるいは架け替え工事をどのような順番で行うかは、利用者の便益また、交通流の確保という見地から大変重要な課題と考えられる。

本研究では、複数の橋梁の補修工事の順序を、構造物の最適設計の手法<sup>1) 2)</sup>で最近注目を浴びているGA (Genetic Algorithm) を用いて、スケジューリング問題への応用の可能性を検討するものである。

## 2. スケジューリング問題

仮想ネットワークにおいて、OD表とゾーン間距離は、表-1、図-1で与える。このネットワークにおいて、区間A-B、A-C、C-D、D-E、D-F、C-G、E-H、F-Iの改良工事を行うとする。以後10年間で、改良工事による費用便益比が最大になるように、改良地点の順番を決定する。

## (1) 費用便益比

費用便益比(本研究の目的関数)は、以下の手続きで算出する。

まず、ネットワークに交通量を配分する。配分方法は、等分割配分法<sup>3)</sup>を用いた。

- ① OD表の各ゾーン間の交通量を $n$ 等分する。
- ② すべての起終点間の最短時間経路を求め、各 $n$ 等分したOD交通量をこれに配分する。
- ③ 図-2、表-2<sup>4)</sup>に示す走行時間関数を用いて、各道路区間の走行時間を修正する。
- ④ 修正された走行時間関数の値より、すべての起終点間の最短時間経路を求め、これに次の各 $n$ 等分されたOD交通量を配分する。
- ⑤ 以上の手続きを $n$ 回繰り返し、配分交通量を求める。

本研究では、 $n=10$ とした。

表-1 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 |

(百台/日)

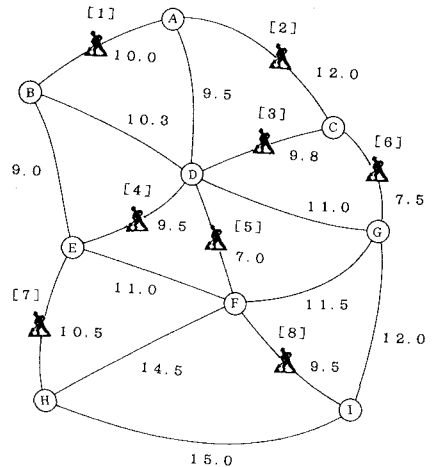


図-1 ネットワーク

求められた配分交通量より、ある年度の経済指標は次の式で計算されるものとする。

(経済指標) = \sum\_{ij} \{ (i, j \text{ ゾーン間の所要時間}) \times (i, j \text{ ゾーン間の年発生交通量}) \times (時間費) \}

ただし、(時間費) = 360 / 時 / 台である。

目的関数である費用便益費は次式で計算されるものとする。

[費用便益比] = \sum\_{k=1}^{10} \{ [現状の経済指標] - [k年度の経済指標] \} / [総費用] \tag{1}

ここで、[現状の経済指標] とは、工事開始前の経済指標であり、[総費用] は、要した工事費の総和である。

(2) 予算と工事条件

本研究では、予算は18億/年とし、予算以内であれば各年度複数の工事を行うことが可能とする。また工事による交通条件の悪化と改良後の改善の状態は、表-3に示す走行時間関数の係数の変化で与えるものとする。

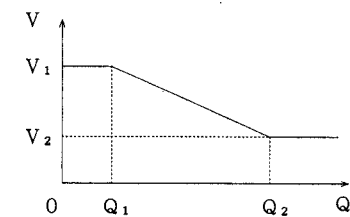


図-2 走行時間関数

表-2 Q-V係数

| ルート | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub> | V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A-B | 50             | 400            | 45             | 10             |
| A-C | 60             | 400            | 40             | 10             |
| A-D | 70             | 400            | 50             | 20             |
| B-D | 80             | 400            | 50             | 15             |
| C-D | 50             | 350            | 40             | 15             |
| B-E | 70             | 400            | 50             | 25             |
| D-E | 60             | 300            | 40             | 15             |
| D-F | 60             | 400            | 30             | 5              |
| D-G | 70             | 350            | 50             | 15             |
| C-G | 70             | 350            | 50             | 15             |
| E-H | 50             | 400            | 50             | 15             |
| E-F | 80             | 400            | 50             | 20             |
| F-G | 60             | 400            | 40             | 10             |
| F-H | 70             | 400            | 50             | 15             |
| F-I | 80             | 400            | 55             | 20             |
| H-I | 50             | 350            | 45             | 15             |

(Q: 百台)

表-3 工事条件

| 工事番号           | 1                | 2                 | 3                  | 4               |
|----------------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| ルート            | A-B              | A-C               | C-D                | D-E             |
| 工事費            | 7500×(1+0.1Y)×10 | (700Y+8000)×12    | (10000+1000Y)×9.8  | 14500×9.5       |
| 工事期間           | 1年               | 1年                | 1年                 | 1年              |
| 工事中の係数         |                  |                   |                    |                 |
| Q <sub>1</sub> | 40               | 50                | 35                 | 40              |
| Q <sub>2</sub> | 100              | 100               | 100                | 150             |
| V <sub>1</sub> | 30               | 30                | 35                 | 25              |
| V <sub>2</sub> | 5                | 5                 | 5                  | 10              |
| 工事後の係数         |                  |                   |                    |                 |
| Q <sub>1</sub> | 140              | 120               | 100                | 120             |
| Q <sub>2</sub> | 450              | 450               | 500                | 500             |
| V <sub>1</sub> | 60               | 65                | 60                 | 60              |
| V <sub>2</sub> | 30               | 30                | 30                 | 30              |
| 工事番号           | 5                | 6                 | 7                  | 8               |
| ルート            | D-F              | C-G               | E-H                | F-I             |
| 工事費            | 170000           | 9000×(1+0.2Y)×7.5 | 2000×(1+0.8Y)×10.5 | (85Y+14500)×9.5 |
| 工事期間           | 1年               | 1年                | 1年                 | 1年              |
| 工事中の係数         |                  |                   |                    |                 |
| Q <sub>1</sub> | -                | 50                | 35                 | 20              |
| Q <sub>2</sub> | -                | 150               | 100                | 100             |
| V <sub>1</sub> | 0                | 40                | 30                 | 30              |
| V <sub>2</sub> | 0                | 10                | 8                  | 6               |
| 工事後の係数         |                  |                   |                    |                 |
| Q <sub>1</sub> | 140              | 100               | 120                | 125             |
| Q <sub>2</sub> | 450              | 500               | 500                | 450             |
| V <sub>1</sub> | 55               | 60                | 60                 | 65              |
| V <sub>2</sub> | 40               | 35                | 30                 | 25              |

(工事費: 万 Q: 百台)

3. 遺伝的アルゴリズム (GA)

生物進化の過程の中で、環境に適応するものが生き残り子孫を残すことができる。時には、突然変異により新しい形質の個体が生まれる歴史を繰り返してきた。

この淘汰、交叉、突然変異を基本オペレータとして最適化設計に利用したのがGAである。

(1) 淘汰

本研究では、目的関数(費用便益比)式(1)を式(2)を用いて適応関数に変換して淘汰を行う。

式(2)の関係を、図-3に示した。

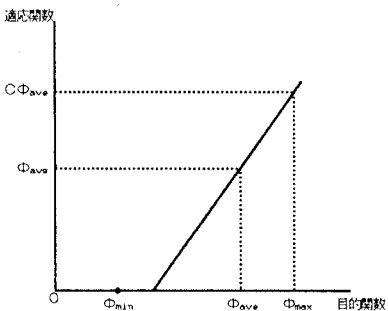


図-3 適応関数への変換

$$F_i^{(t)} = a \times \Phi_i^{(t)} - b \quad (i = 1 \sim N) \quad (2)$$

ただし、

$$a = \Phi_{avg} (C - 1) / (\Phi_{max} - \Phi_{avg})$$

$$b = \Phi_{avg} (C \Phi_{avg} - \Phi_{max}) / (\Phi_{max} - \Phi_{avg})$$

$$C = 1.5$$

ここで、Nは人口サイズ、 $\Phi_{avg}$  は各世代における目的関数の平均値、 $\Phi_{max}$  は各世代における目的関数の最大値である。

## (2) 交叉

通常の組合せ問題等で用いられているGAの交叉方法では、

親A: 2 8 5 4 1 | 6 3 7      子A: 2 8 5 4 1 1 2 5

親B: 7 4 6 3 8 | 1 2 5      子B: 7 4 6 3 8 6 3 7

となり、「1つの工事は1回のみ行う」という条件を満たさないので、交叉方法に工夫が必要となる。

そこで本研究では、以下の2種類の交叉方法を用いることにした。

### 1) 交叉法1<sup>5)</sup>

①切断箇所を確率的に決める。

親A: 2 8 5 4 1 | 6 3 7

親B: 7 4 6 3 8 | 1 2 5

②子は、親の切断箇所の左右のセルの個数の多い方を受け継ぐ<sup>6)</sup>。

子A: 2 8 5 4 1 □ □ □

子B: 7 4 6 3 8 □ □ □

③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入れる。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重複しない数字を右から入れる。この結果、

子A: 2 8 5 4 1 7 6 3

子B: 7 4 6 3 8 2 5 1

となり、子線列が作成する。

### 2) 交叉法2<sup>7)</sup>

①標準リストを作成する。

[1 2 3 4 5 6 7 8]

②切断箇所を確率的に決める。

親A: 2 8 5 4 1 | 6 3 7

親B: 7 4 6 3 8 | 1 2 5

③切断箇所の左右のセルの個数の多い側から<sup>8)</sup>の線列の数字が、上の標準リストから何番目にある数字かを決める。この時1度選ばれた数字は、標準リストから削除される。

親A: 2 8 5 4 1 6 3 7    [2 7 4 3 1 2 1 1]

親B: 7 4 6 3 8 1 2 5    [7 4 5 3 4 1 1 1]

④1点交叉する。

[2 7 4 3 1 | 2 1 1]    [2 7 4 3 1 1 1 1]

[7 4 5 3 4 | 1 1 1]    [7 4 5 3 4 2 1 1]

⑤上と逆の方法で線列に戻す。

標準リスト [1 2 3 4 5 6 7 8]

[ 2 7 4 3 1 1 1 1 ] ⇔ 2 8 5 4 1 3 6 7  
 [ 7 4 5 3 4 2 1 1 ] ⇔ 7 4 6 3 8 2 1 5

⑥次世代の子線列ができる。

子A: 2 8 5 4 1 3 6 7

子B: 7 4 6 3 8 2 1 5

### (3) 突然変異

交叉だけでは、限られた範囲でしか探索しない恐れがある。そのため、探索する範囲を拡げる目的で、少ない確率で突然変異を行う。本研究では、以下に述べる2種類の突然変異を用いた。

#### 1) 突然変異法1

切断箇所を確率的に2カ所決め、切断間の数字の順序を入れ換える。

線列: 2 8 5 4 1 3 6 7 ⇔ 線列: 2 8 5 6 3 1 4 7  
 ↓ ↓

#### 2) 突然変異法2

入れ換える箇所を確率的に2カ所決め、入れ換えを行う。

線列: 2 8 5 4 1 3 6 7 ⇔ 線列: 2 3 5 4 1 8 6 7  
 ↓ ↓

## 4. 計算例と考察

GAを数世代行うとある値に収束する挙動を示す。しかし、その値が最適解である保証はない。そこで本研究では、適応関数への変換時にある値に収束していくと、適応関数の最大値が1.5から1.0に向かう動きをすることを利用して、適応関数の最大値がある値（本研究では1.3）になると、突然変異の確率を上げて（突然変異の確率50%）探索の範囲を更に拡げる操作（方法2）をし、単純GA（方法1）との比較を行った。

表-4 GAによる結果

図-1に示した、工事箇所8の場合の結果を示す。計算には、VAX3100を使用した。

GAを用いた結果を表-4に示す。ここで処理時間の単位は秒、処理回数は、計算終了までに費用便益比を求めたのべ数である。この結果より、方法1、2共に交叉法2の時に高い確率で解が求まり、処理時間も最も長い場合でも約3分で解が求まっている。

さらに、GAとランダムサーチを比較するために、表-4において処理回数が最も多かった379回と1000回、ランダムに線列を発生させて目的関数の値を計算した。

| 乱数初期値=331                   |   |      |          |       |       |      |     |
|-----------------------------|---|------|----------|-------|-------|------|-----|
| 交 叉 の 確 率 =60% 突然変異の確率=1/30 |   |      |          |       |       |      |     |
| 法                           | 双 | 交叉回数 | 線列       | 目的関数  | 世代    | 処理回数 | 時間  |
| 1                           | 1 | 1    | 62175384 | 2.642 | 14/26 | 199  | 102 |
|                             |   | 2    | 62715384 | 2.642 | 17/30 | 254  | 124 |
|                             | 2 | 1    | 26374581 | 2.649 | 12/27 | 188  | 95  |
|                             |   | 2    | 26374581 | 2.649 | 9/23  | 147  | 76  |
| 2                           | 1 | 1    | 62175384 | 2.642 | 14/21 | 214  | 109 |
|                             |   | 2    | 62734581 | 2.649 | 22/30 | 367  | 180 |
|                             | 2 | 1    | 26374581 | 2.649 | 12/27 | 239  | 120 |
|                             |   | 2    | 26374581 | 2.649 | 9/24  | 244  | 122 |
| 交 叉 の 確 率 =75% 突然変異の確率=1/30 |   |      |          |       |       |      |     |
| 1                           | 1 | 1    | 62175384 | 2.642 | 11/22 | 214  | 106 |
|                             |   | 2    | 62175384 | 2.642 | 24/30 | 223  | 111 |
|                             | 2 | 1    | 62735841 | 2.645 | 8/23  | 236  | 118 |
|                             |   | 2    | 26374581 | 2.649 | 17/30 | 268  | 132 |
| 2                           | 1 | 1    | 62175384 | 2.642 | 11/28 | 292  | 145 |
|                             |   | 2    | 62175384 | 2.642 | 28/30 | 279  | 140 |
|                             | 2 | 1    | 62735841 | 2.645 | 8/23  | 270  | 134 |
|                             |   | 2    | 62374581 | 2.649 | 19/30 | 379  | 188 |

その結果の頻度分布を図-4に示す。このランダムサーチの解は、379回、1000回の発生回数ともに、

1年度 2年度 3年度 4年度 5年度 6年度 費用便益比  
 2 6 3 7 4 8 1 5 ..... 2.603

379回の時の費用便益費の平均値は1.821、1000回の平均値は1.828となる。

また、列挙法により費用便益比の最大値と最小値を求めた。設計変数8の場合の組み合わせ数は、8！す

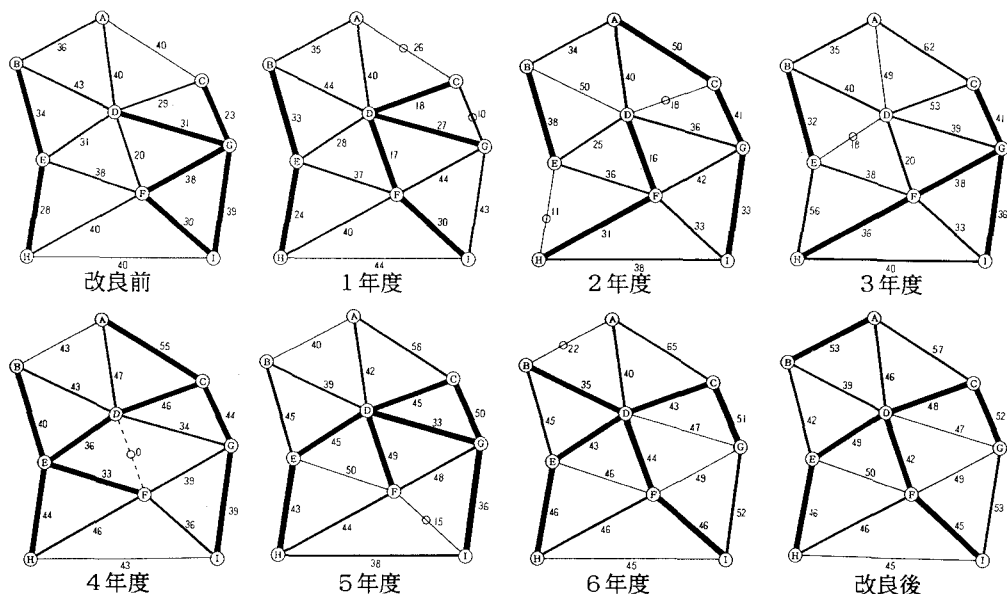


図5. a 経年的変化 (最適値の場合)

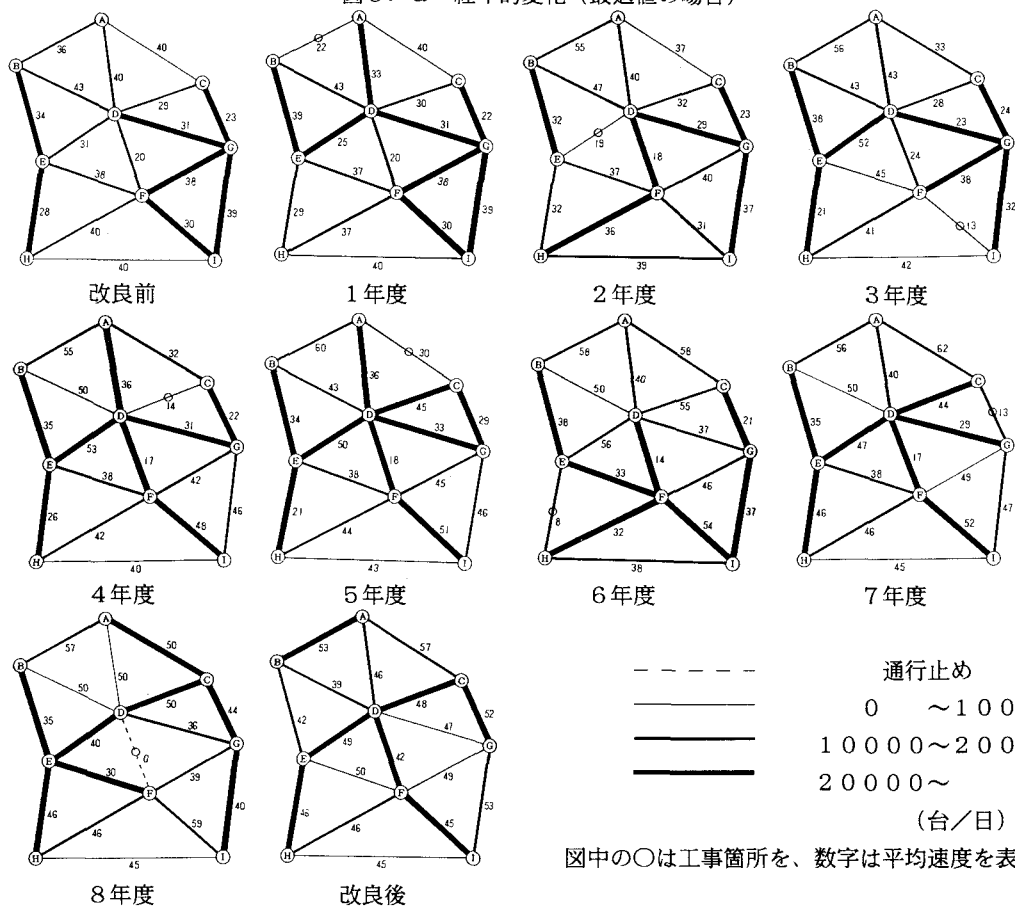


図5. b 経年的変化 (最悪値の場合)

なわち40320通りあり、計算時間はほぼ6時間であった。その結果得られた最大値は、

| 1年度 | 2年度   | 3年度   | 4年度 | 5年度 | 6年度 | 費用便益比 |
|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 2   | 6     | 3     | 7   | 4   | 5   | 8     |
| 1   | ..... | 2.649 |     |     |     |       |

であり、GAの結果(表-4)が真の解を与えている事がわかった。

また、最小値は、

| 1年度 | 2年度 | 3年度 | 4年度 | 5年度 | 6年度 | 7年度 | 8年度 | 費用便益比 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1   | 4   | 8   | 3   | 2   | 7   | 6   | 5   | 1.092 |

であり、これらのは平均値は、1.836であった。

列挙法で得られた、費用便益比の最大値と最小値の場合の交通量の経年的変化を、参考のため前ページの図-5. a, bに示した。これらの図において、ノード間の各線の太さは、交通量を表す。

これらの結果より、GAとランダムサーチの比較をすると、すべての場合において、GAの方がランダムに線列を発生させた時より目的関数の値が大きくなっていて、GAの効果が見られる。また、交叉法2の時に高い確率で最適解が求まっている。

さらに、突然変異の確率をある値で変化させた結果と単純GAでは、1つのケースで解の改善が見られた程度であったが、探索範囲を広げる1手段として有効な方法であると思われる。

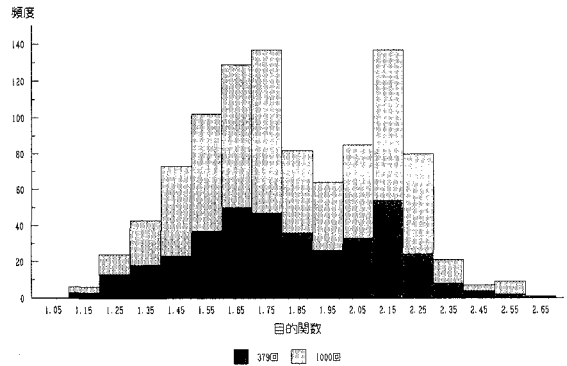


図-4 頻度分布図

## 5. あとがき

道路ネットワーク上にある橋梁の補修工事、あるいは重要な道路工事の施工の順番を決める問題は、本研究のように時間的な要因が入ると難しい問題になる。ところが、GAでは、それらの困難さは容易にクリアでき、簡単なモデルに適用してみてその可能性を検討した。

GAによる結果は、必ずしも真の解を与えるという保証はないが、問題に対して頑健であり、またより多くの工事箇所がある場合でも容易に応用できるので、今後この種の問題の解法として有力ではないかと考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり、室蘭工業大学の田村亨助教授の貴重なご助言があった事を付記し、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 杉本博之: GAの工業設計への応用にむけて、数理科学、No.353、NOVEMBER、pp.45-50、1992.
- 2) Sugimoto, H.: DISCRETE OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES AND GENETIC ALGORITHMS, Proc. of the Korea-Japan Joint Seminar held in Seoul, Korea, pp.1-10, 1992.
- 3) 佐佐木綱: 都市交通計画, 国民科学社, 1979.
- 4) 巻上安爾・井上矩之・三星昭宏: 交通工学, 理工図書株式会社, 1991.
- 5) 須貝康雄・平田廣則: 組合わせ最適化アルゴリズムとその応用, 計測と制御 Vol.29 No12, pp.18 ~ 25, 1990.
- 6) 小林重信: 形質遺伝を考慮した遺伝的アルゴリズムの1方法, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.187~192, 1991.
- 7) 和田健之介: 遺伝的アルゴリズムと機械の進化, 数理科学, No.328, pp.47-51, 1990.