

道路橋の維持管理計画支援システムへのウイルス進化型 GA の適用

APPLICATION OF VIRUS EVOLUTIONARY - GENETIC ALGORITHM TO
A DECISION SUPPORTING SYSTEM FOR MAINTENANCE OF STEEL BRIDGES

築山 勲*, 古田 均**, 堂垣正博***

Isao TSUKIYAMA, Hitoshi FURUTA, and Masahiro DOGAKI

- | | | |
|----------|--------------------|---------------------------|
| * 学士（工学） | 関西大学大学院工学研究科土木工学専攻 | （〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35） |
| ** 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） |
| *** 工博 | 関西大学教授 工学部土木工学科 | （〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35） |

In this paper, an attempt is made to develop a decision supporting system for the maintenance program of Reinforced Concrete (RC) decks of steel bridges. Emphasis is placed on how to obtain an appropriate order of repair for the existing RC decks by considering the characteristics of the highway network, and by applying the concept of life cycle cost. Namely, in order to account for the importance of each bridge and the adequate resource allocation, the influence of repair works on the surrounding areas and various practical technical and economical conditions for their repair are considered. And in the case of planning the repair program, the several-years evaluation of the repair plan is considered. Genetic algorithm (GA) is employed here to find a practical and rational solution for the maintenance problem, because GA has such an advantage that it can provide us with useful solutions for large and complex combinatorial and scheduling problems with discontinuous or vague objective functions. We apply the virus evolutionally genetic algorithm (VE-GA) to the supporting system in order to find the optimal solution more fast.

Key Words: Virus Evolutionally Genetic algorithm, Maintenance, Optimal repairing, Life cycle cost, RC decks

1. まえがき

2,030 年頃になれば、耐用年数を超える道路橋が全橋の半数を占めるといわれる¹⁾。これらを長期にわたって健全に保つには、補修や補強を適切に実施するほかには、現在、国や地方の財政は以前にも増して厳しい状況にあり、維持管理に費やせる予算もおのずと限られている。そのため、限られた予算を補修・補強が必要な道路橋に効率よく配分し、効果的な維持管理計画を立てる必要がある。ただし、道路は日々の市民生活や経済活動と密接な関係にあるため、橋梁の維持管理業務が道路利用者や周辺環境に及ぼす影響を考慮した維持管理計画でなければならない。

ところで、大規模な組合せ最適化問題の解法の一つに遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) がある。組合せ最適化問題に定式化された橋梁の維持管理計画問題には、しばしば GA が用いられてきた^{2)~6)}。筆者らはこれまで、道路網上の橋梁群を日常的に点検し、それ

らから橋梁の経年劣化の進行を予測し、ライフサイクルコスト分析のもとに効率的な維持管理が計画できる支援システムを開発してきた。最適な解探索に用いた GA⁷⁾は、残念ながら依然として多くの演算時間を要し、解探索の効率化が課題であった。

本研究では、対象橋梁の増加と道路網の複雑化を念頭に、より短時間に効率的な維持管理計画を立案するため、GA に共進化アルゴリズムの一種でウイルス進化の概念を導入したウイルス進化型 GA (VE-GA) の適用を試みた。

2. ウイルス進化型 GA (VE-GA)⁸⁾ による組合せ最適化問題の解法

まず、組合せ最適化問題の解法の基礎となるウイルス進化論、およびウイルス機能を定式化したウイルス感染操作とウイルス感染操作を取り入れた GA すなわち VE-GA について述べる。

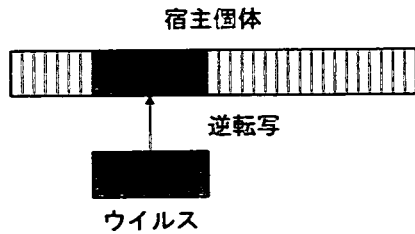


図-1 逆転写操作

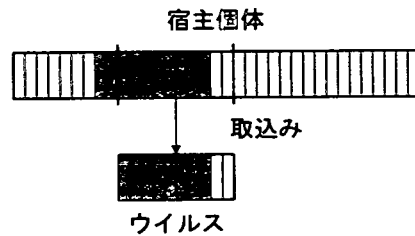


図-2 取込み操作

2.1 ウイルス進化論

組合せ最適化問題の解法の一つである GA は、一般に、ダーウィンの進化論に基づき、交叉、突然変異、淘汰などの遺伝子操作を行い、適者生存の原則に則り、より適応度の高い個体を生存・進化させながら最適な解に到達しようとする最適化手法である。

一方、ウイルス進化論⁹⁾に基づくウイルス進化型 GA も最適化手法の一つである。これは、ウイルス感染による生物個体間の遺伝子の水平伝播と、その子孫への遺伝子の垂直伝播が進化のプロセスとなる。

2.2 ウイルス感染操作

ウイルスには、つぎの逆転写と取込みの2機能が備わっている。ウイルスに感染する操作とは、宿主個体間で遺伝子の水平移動を可能にすることである。すなわち、

①逆転写操作：ウイルスの持つ遺伝子列を宿主個体に転写する操作（図-1を参照）。

②取込み操作：宿主個体から遺伝子列を取込む操作で、宿主個体のまったく異なった遺伝子列を取込む操作と宿主個体の遺伝子の一部を取込む操作がある（図-2を参照）。

ウイルス i は、宿主個体に逆転写することで得られる宿主個体の適応度の変化量（改善度）を表すパラメータ $fitvirus_i$ を持つ。ウイルス i に感染した宿主個体群を S とし、宿主個体 $j(j \in S)$ に逆転写する前後の適応度をそれぞれ $fithost_j$, $fithost'_j$ とすれば、 $fitvirus_{i,j}$, $fitvirus_i$ は

$$fitvirus_{i,j} = fithost'_j - fithost_j \quad (1)$$

$$fitvirus_i = \sum_{j=1} fitvirus_{i,j} \quad (2)$$

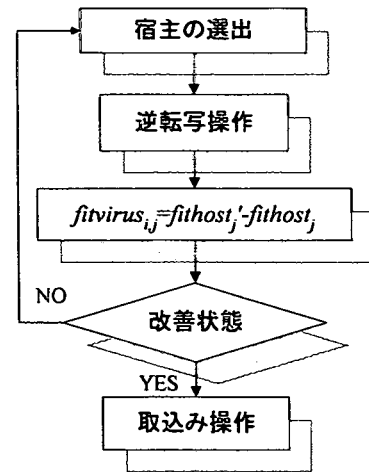


図-3 ウイルス感染

となる。

ウイルス感染は図-3のように表される。各ウイルスは、まず、宿主をランダムに選択し、宿主の遺伝子列にウイルスの遺伝子列を逆転写する。つぎに、宿主個体の改善度を評価し、改善度の和が各世代におけるウイルス個体の適応度となる。したがって、ウイルスの適応度が高いほど宿主個体群の適応度の改善すなわち進化が進行していることを示す。このようにして、ウイルスは宿主個体の適応度が高くなる有効な遺伝子列を水平伝播する。しかし、ウイルス中には宿主個体を改善しないものも含まれている。したがって、ウイルス自体の宿主個体群に対する適応度を考慮する必要がある。

そこで、ウイルス i は生命力 $life_{i,t}$ を持ち、一世代ごとの生命力減衰率を $r(0 < r < 1.0)$ とすれば、

$$life_{i,t+1} = r \times life_{i,t} + fitvirus_i \quad (3)$$

となる。ここに、生命力減衰率 r は過去の改善度に重みを付ける係数である。ちなみに、 r が小さいほど過去の世代における改善度が考慮されない。また、生命力がゼロになれば、まったく新しい宿主個体を選択し、取込みで新ウイルスの遺伝子列を生成する。

2.3 ウイルス進化型 GA (VE-GA)

VE-GA は、GA に前節のウイルス個体群を採用した最適化手法である。

VE-GA は、解候補の個体群を宿主個体群、部分的な遺伝子情報を持つ個体群をウイルス個体群とし、これら2種の個体群の相互作用による共進化に基づいた GA である。VE-GA 手法の利点は、ウイルス個体の存在で有意な遺伝子列の破壊が回避できる点にある。また、GA 手法は基本的に知識を必要としないので、局所探索や指向性探索はできない。一方、VE-GA はウイルスの水平伝播で

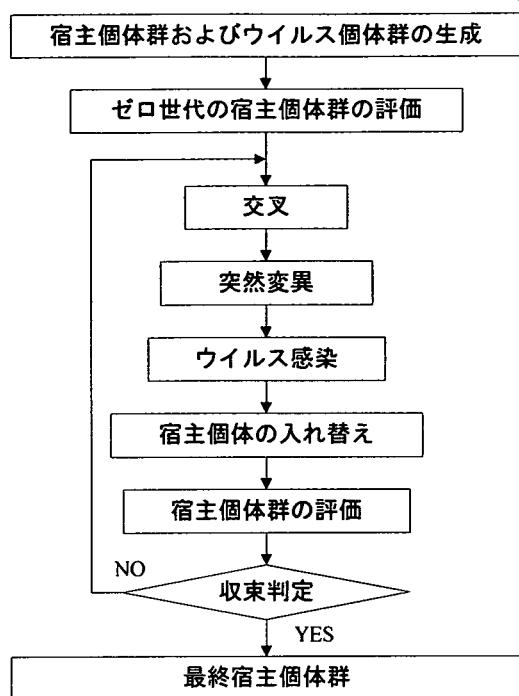


図-4 VE-GA の流れ図

指向性を帯びることになり、解の効率的な探索が可能になる。

以下に VE-GA 手法の手順を示す（図-4 を参照）。

Step1：宿主個体群およびウイルス個体群の生成

ランダムな遺伝子列をもつ宿主個体群を生成し、
取込み操作でウイルス個体群を宿主個体群から生成する。

Step2：ゼロ世代の宿主個体群の評価

宿主個体群を評価する。

Step3：交叉および突然変異

GA と同様、交叉と突然変異の操作を行う。

Step4：ウイルス感染

ウイルスの逆転写操作と取込み操作を行う。

Step5：宿主個体群の入れ替え

ウイルス感染の操作で適応度が改善された宿主個体を入れ替える。

Step6：宿主個体群の評価

宿主個体群を評価する。

Step7：収束判定

宿主個体群の収束を判定する。収束していない場合には、Step3 から Step7 の手順を繰り返す。

3. 道路橋の維持管理計画支援システム

道路橋の維持管理計画支援システムは、道路網上に存在する橋梁群を経済的かつ効率的に維持管理するための補修計画を立案するシステムである。

この目的は、多数の橋梁を管理する者が、毎年度、補

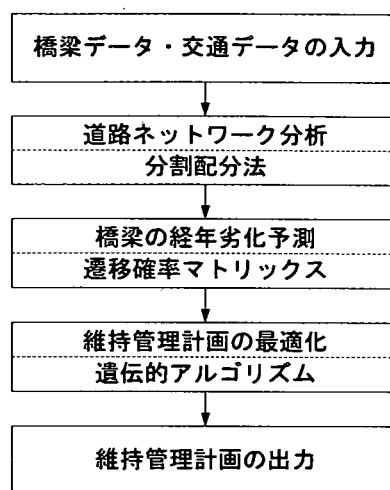


図-5 道路橋の維持管理計画支援システムの流れ図

修予算内で効率的な維持管理を速やかに計画するための支援ツールである。そのため、どの橋梁を、いつ、どのような工法で補修・補強すれば、経済的かつ効率的な維持管理になるかを維持管理に関係するさまざまな項目を考慮しながら考える必要がある。

ここでは、①補修費用、②補修工法による効果、③工事の道路利用者や周辺住民への影響、を多数の補修案を評価する指標とする。評価関数には LCC 分析の一手法である Cost Effectiveness を適用し、上の 3 条件を満たす解を多目的組合せ最適化問題から導出する⁷⁾。

3.1 維持管理支援システムの概要

道路橋の維持管理計画支援システムの流れは、図-5 のようである。

まず、対象とする道路網上のすべての橋梁と道路交通に関するデータを入力する。つぎに、道路特性と道路交通の起点と終点を表す OD 表から分割配分法で道路網の交通量を算出する。同時に、各橋梁の単位時間あたりの便益を時間価値原単位と走行費用から求める。

つぎに、各橋梁の点検データより、点検時の橋梁の損傷ランクを判定する。そして、個々の橋梁における損傷状態と橋梁の劣化過程を表現した遷移確率マトリックスで橋梁の経年劣化を予測する。その結果、“When, Which, How” の組合せ最適化問題とした複数年にわたる最適な維持管理計画を最適化手法 GA で探索する。

3.2 維持管理支援システムに用いる GA について

本研究では、単目的の計画に単純 GA を、多目的の計画にパレート保存戦略に基づく GA を適用する。

(1) コーディング

RC 床版の補修・補強工法は、表-1 に示す 3 ビットの遺伝子列で表される。GA によって生成される個体の遺伝子列が補修・補強の対策を表し、対策に対応した工法

表-1 各補修・補強工法の GA コード

コード	対策	補修・補強工法
000	補修	ひび割れ注入工法 断面修復工法
001	補強①	FRP接着工法 鋼板接着工法 縦桁増設工法
010	補強②	床版増厚工法
011	補強① +補修	FRP接着工法+補修 鋼板接着工法+補修 縦桁増設工法+補修
100	補強② +補修	床版増厚工法+補修
101	打ち替え	全面打ち替え工法 部分打ち替え工法
110	—	補修なし
111	—	補修なし

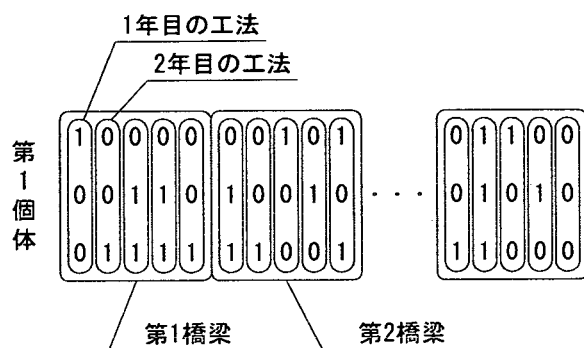


図-6 維持管理計画のコーディング

の中から損傷状態と損傷原因、構造条件を考慮して、最も適した工法が選出される。

また、0と1の3桁でコーディングした補修・補強工法を、図-6のように2次元配列に並べ替えることで、一つの計画案をなすこととなる。3桁で表した補修・補強工法を縦に並び替え、それらを横に並べることで計画期間と各橋梁を表す。

(2) 制約条件

GAで探索された解の中には、維持管理の条件に合致しないものも存在する。たとえば、総工費が予算を超える場合や、道路網が完全に封鎖してしまう場合がこれにあたる。そのような解は不適切であるため、その評価値にペナルティを与え、解に選ばれないようにする。

4. 数値計算結果とその考察

VE-GAを用いた道路橋維持管理計画支援システムを稼動した結果を以下に述べる。道路網に点在する20橋の中からRC床版の補修が必要な橋梁、その補修工法、その時期からなる維持管理計画を提示する。

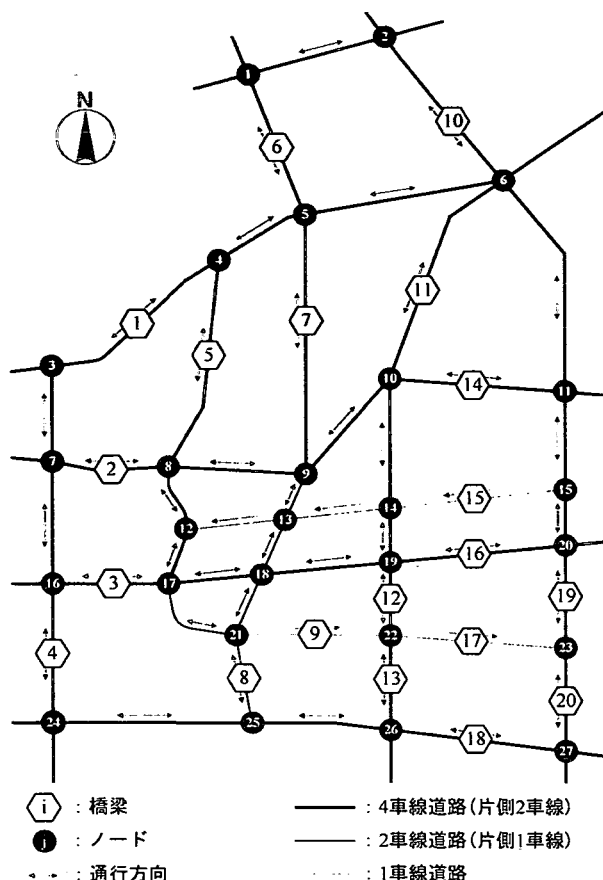


図-7 維持管理計画エリア

また、同一条件のもとに、既往の研究で用いた支援システム⁷⁾で補修計画案を探索した。

4.1 解析の対象地域

解析対象として、図-7に示す維持管理計画エリア（大阪市北東部の道路網をモデル化したもの）を設定した。道路網内には、20橋の橋梁が存在する。維持管理を行う対象は、橋梁を構成する要素の中で、特に損傷の著しいRC床版を対象とする。それぞれの橋梁に対し、橋長、RC床版の面積と損傷面積、点検からの経過年数、RC床版のひび割れ密度、RC床版の主な損傷状態と主な損傷原因を表-2のように設定した。

4.2 VE-GA パラメータの最適値

VE-GAに必要なパラメータすなわち個体数、交叉率、突然変異率、ウイルス感染率、ウイルス生命力、ウイルス生命力減衰率の最適値を検討した結果、表-3を得た。

4.3 維持管理計画の立案

VE-GAを組み込んだ支援システムの有効性を検討するため、前述の道路網に点在する20橋の中からRC床版の補修が必要な橋梁、その補修工法、その時期からなる維持管理計画を提示する。

表-2 橋梁データ

橋梁番号	橋長 (m)	RC 床版面積 (m ²)	損傷面積 (m ²)	点検経過年数 (年)	ひび割れ密度 (m/m ²)	主な損傷状態	主な損傷原因
1	150	3604	1441	3	4.2	2方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
2	145	3770	754	3	7.1	漏水, 錆の流出, 剥離	過大モーメントの作用
3	188	4408	881	3	3.2	2方向ひび割れ	—
4	155	2712	233	3	6.9	亀甲状ひび割れ, 空洞, 部分的損傷	過大な輪荷重の作用, コンクリートの品質, 施工の不良
5	42.5	1062	531	1	8.2	床版陥没, 部分的損傷, 一方向のひび割れが橋軸直角方向に卓越	設計耐力の不足
6	479	10294	2058	2	3.2	2方向ひび割れ, 豆板, 部分的損傷	配力鉄筋の不足
7	42.1	1031	82.0	1	2.1	一方向ひび割れ	—
8	35.9	326	105	4	6.1	亀甲状ひび割れ	過大モーメントの作用
9	65.8	461	300	4	8.5	遊離石灰, 漏水, 錆の流出	過大な輪荷重の作用
10	561	10947	2189	2	6.2	亀甲状ひび割れ	床版の剛性不足
11	43.2	1040	104	1	5.1	一方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
12	56.3	1238	123	1	8.3	漏水, 錆の流出, 部分的損傷, ひび割れに黄色の溶出物沈着を観測	配力鉄筋の不足
13	48.2	1118	223	1	3.2	2方向ひび割れ, 剥離	—
14	41.6	936	93	2	8.1	遊離石灰	過大な輪荷重の作用
15	36.1	198	39.0	2	4.4	2方向ひび割れ	経年による老朽化
16	42.0	966	241	2	8.7	漏水, 錆の流出, 剥離	過大モーメントの作用, 老朽化
17	36.2	260	35.0	2	2.9	一方向ひび割れ	—
18	42.3	850	542	3	6.9	亀甲状ひび割れ, 空洞, 部分的損傷	過大モーメントの作用
19	55.6	1278	153	2	3.7	2方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
20	48.0	1058	211	2	6.1	亀甲状ひび割れ	過大な輪荷重の作用

単年度ごとの維持管理費を1億円とし, 5年間の複数年度にわたる計画を探索した結果, 表-4を得た。これによれば, GAを用いた支援システムでの結果とほぼ同様の結果¹⁰⁾となり, GAより改善された計画案を示すには至らなかった。

4.4 VE-GAとGAの比較

VE-GAとGAとによるシステムを同一条件で稼働し, 補修計画を探索したところ, 図-8に示す世代数と適応度の関係を得た。GAでは, 150世代前後で解が収束した。一方, VE-GAは, GAより適応度の向上が早く, 30から100世代あたりで最も解の隔たりが大きい。VE-GAの解は, 100世代前後で収束している。したがって, VE-GAはGAより適応度のよい維持管理計画を早く探索できる。

表-3 VE-GAのパラメータ

個体数	100
交叉率	0.4
突然変異率	0.01
ウイルス感染率	0.1
ウイルス生命力	5.0
ウイルス生命力減衰率	0.5

5. あとがき

先に提案した筆者らの道路橋維持管理計画支援システム⁷⁾で採用した単純GAの代わりにVE-GAなる新たな

表-4 道路橋RC床版の維持管理計画案

橋梁番号	健全度ランク	補修年度	補修工法
1	II	—	—
2	IV	—	—
3	II	—	—
4	III	1年後	鋼板接着
5	V	計画年	部分打ち替え
6	II	—	—
7	I	—	—
8	III	計画年	床版増厚+ひび割れ注入
9	V	計画年	FRP接着
10	III	—	—
11	II	1年後	鋼板接着+ひび割れ注入
12	V	計画年	部分打ち替え
13	II	4年後	FRP接着+断面修復
14	V	計画年	部分打ち替え
15	II	—	—
16	IV	1年後	縦桁増設
17	I	—	—
18	III	計画年	部分打ち替え
19	II	1年後	鋼板接着
20	III	—	—

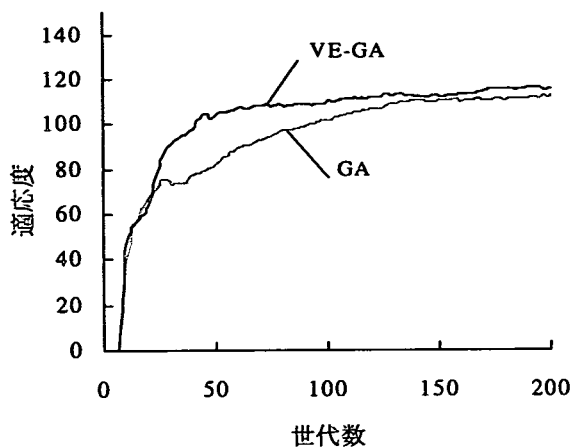


図-8 VE-GA と GA の世代数と適応度

な GA をシステムに導入した。その結果、従来より改善された計画を提示することはできなかったが、より早く適応度の高い維持管理計画を求めることができた。ただし、VE-GA には単純 GA より多くの制御パラメータがある。そのため、実用化の際には、十分な制御パラメータの調整が必要である。また、実用化された場合、より大規模な組合せ問題となるため、その場合の検証も必要である。

参考文献

1) 西川和廣:社会資本の維持管理, 土木学会誌, Vol.83, No.2, pp.35-37, 1998-2.

2) 小野正樹・中村秀明・宮本文穂・河村 圭: 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, 土木情報システム論文集, pp.181-188, 1997.

3) 古田 均・賀 健紅・渡邊英一: 遺伝的アルゴリズムを用いた RC 床版の維持管理支援ファジィエキスパートシステム, 第 2 回ファジィ土木応用シンポジウム講演会論文集, pp.27-36, 1994-12.

4) 近田康夫・橋 謙二・城戸隆良・小堀為雄: GA による既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.151-159, 1995-4.

5) 近田康夫・西雄一・廣瀬彰則・城戸隆良: スケジュールを考慮した GA 援用橋梁補修計画支援の試み, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.46A, pp.371-378, 2000-3.

6) 田村 亨・杉本博之・上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994-1.

7) 能勢義夫・古田 均・堂垣正博: 道路橋の維持管理計画のライフサイクルコストモデル, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-A323, 2000-9.

8) 久保田直行・福田敏男: ウイルス進化型遺伝的アルゴリズムの巡回セールスマン問題への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, pp.408-414, 1998-5.

9) 仲原英臣・佐川 峻: ウイルス進化論, 泰流社, 1989-7.

10) 古田 均・築山 勲・堂垣正博: 道路橋 RC 床版のライフサイクルコスト分析による最適維持管理計画, JCOSSAR2000 論文集, 82-A, pp.497-504, 2000-11.