

# 振動解析とソフトコンピューティングによる橋梁損傷同定法の開発

## Development of A Damage Identification Approach to Railway Viaducts Using Train-Induced Vibration Analysis and Soft Computing Methods

○何 興文\* 林川俊郎\*\* 川谷充郎\*\*\* 松本高志\*\*\*\*  
Xingwen HE Toshiro HAYASHIKAWA Mitsuo KAWATANI Takashi MATSUMOTO

**ABSTRACT** This research is intended to establish a damage identification approach to the railway viaducts using train-induced vibration data. In this approach, only direct vibration analyses are employed. Possible damage patterns are assumed in advance and the bridge responses are simulated using a developed train-bridge interaction analysis procedure. If the calculated responses due to a certain damage pattern are identical to the recorded ones, then the damage can be identified. To make the proposed approach practicable to actual structures, soft computing methods are introduced to simplify and optimize the identification process. The basic concepts and process are represented using simple numerical models in this paper.

**KeyWords:** 鉄道橋, 健全度評価, 連成振動解析, ソフトコンピューティング

*Railway bridges, Soundness evaluation, Coupled vibration analysis, Soft computing*

### 1. まえがき

近年, 高度経済成長期に建設された多くの構造物の劣化・老朽化が進行し, 鉄道橋梁を含む社会基盤施設に対する維持管理への関心は高まっている。一般に鉄道橋梁の検査は, 目視を主体とした全般検査が実施されている。また目視し難い変状を把握するために, 衝撃振動試験による評価手法も導入されている。しかし, これら伝統的な手法は多くの技術者と多大なコストを要し, 簡単に実施できない。今後の少子高齢化や技術継承への課題を踏まえると, 膨大な構造物を少ない技術者でより効率的にメンテナンスしていく必要があり, 新たな視点からの実用的な健全度評価の一次抽出手法が求められている。

構造物の健全度が何らかの要因によって損なわれた場合, 損傷した部材の剛性や減衰性能, 場合によっては質量が変化し, 走行荷重下で健全な構造物と異なる振動特性が現れる。こうした構造物が発信する情報を把握することより, 健全度評価に活用できる<sup>1)</sup>。鉄道においても, 振動モニタリ

ングによる健全度評価は有用であると報告されている<sup>2)</sup>。列車走行による鉄道振動の測定は比較的容易で, 鉄道事業者だけでなく沿線自治体も含め, 多数かつ継続的に実施されている状況にある。これらの振動データを適切に利用し橋梁の健全度を把握できれば, 効率的なヘルスマニタリング手法になると考えられる。

現在の構造同定における代表的なパラメトリック手法等では, 部材数が多く自由度の大きな構造については, 逆解析の誤差等によって同定そのものが困難である。そこで, この逆解析による問題点を回避すべく, 本研究では近年工学的問題への応用が著しいソフトコンピューティング理論を取り入れ, 実測応答から逆解析により構造の損傷を同定する方法ではなく, 交通振動順解析による健全度評価手法の構築を試みる。具体的には, 想定し得る損傷パターンを入力して順解析により構造応答を計算し, これを実測値と比較することにより, 損傷パターンすなわち橋梁の損傷部位及びその程度を推定する。

---

\*博(工) 北海道大学大学院工学研究院助教 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)  
\*\*工博 北海道大学大学院工学研究院教授 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目) 第 2 種正会員  
\*\*\*工博 神戸大学大学院工学研究科教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1) 第 2 種正会員  
\*\*\*\*Ph. D. 北海道大学大学院工学研究院准教授 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目) 第 2 種正会員

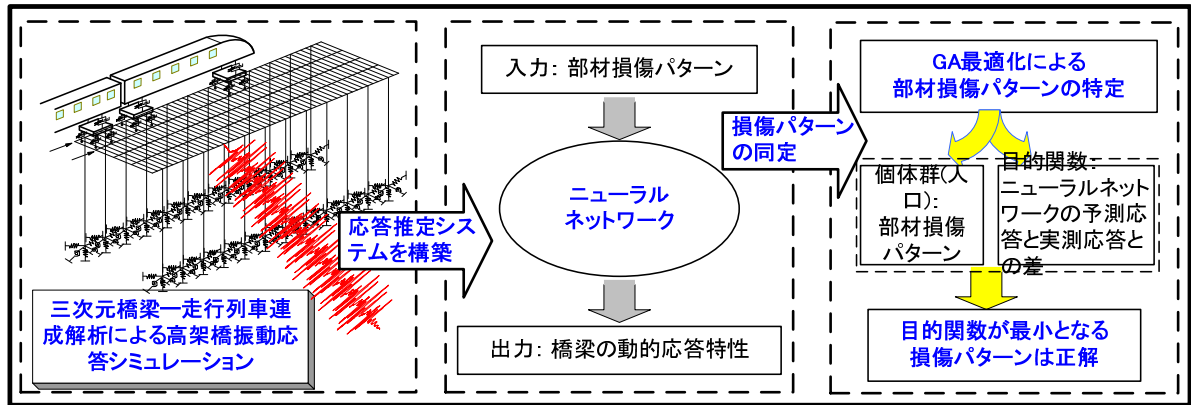


Fig. 1 Total image of proposed health monitoring approach

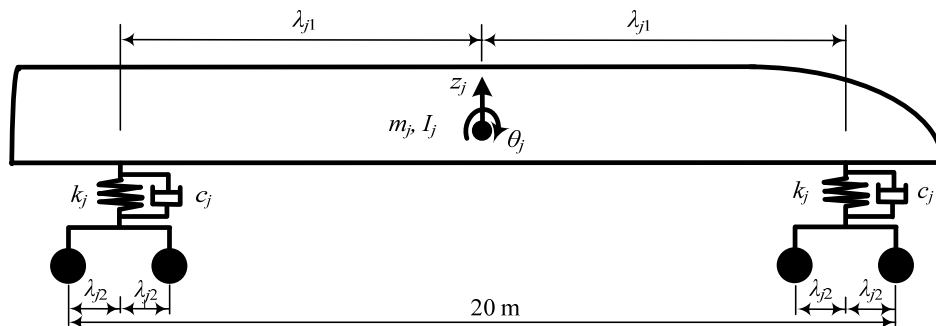


Fig. 2 Two-DOF bullet train car model

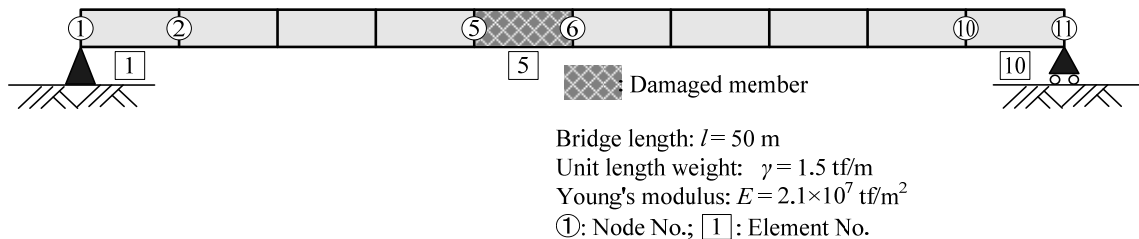


Fig. 3 Simple girder bridge model

## 2. 理論構想

考案した手法を実用かつ効率的なものにするために、次のように橋梁—走行列車連成振動解析手法とソフトコンピューティング理論を応用する。全体的な手法のイメージについて、Fig. 1に示す。

a) 一回の振動解析自体が膨大な計算コストを要するため、実用において簡単に実施できない。そのために本研究では、入出力を対応づける学習によって構造応答を同定できるニューラルネットワ

ーク (Neural Network, 以下NN) を構築する。構築に際し、模型実験や実測の代わりに、橋梁—走行列車連成解析手法による高架橋振動応答のシミュレーション結果を用いる。すなわち、解析による構造の応答値をネットワークの学習における教師データとして用いる。ただし、本論文で初期適用性検討に用いる橋梁と列車モデルは非常に単純なもので計算量が少ないため、NNの応用は省略するものとした。

b) 構築したNNをツールとして、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GA) による最適化手法を用いて構造部材の損傷パターンを特定する。具体的には構造物の部材損傷パターンをGAにおける個体群 (人口) とし、構築したNNから出力した構造物の応答と実測値との差を目的関数に設定する。目的関数が最小つまり推定した応答と実測値が最も近い場合の損傷パターンが、求める解である。

### 3. 橋梁-列車連成振動解析手法

本研究では、手法開発における解析で新幹線列車及び鉄道橋梁を想定する。最初段階の基本検討として、構想した橋梁健全度評価手法の適用性を検証するために、まず簡単な平面 2 自由度列車モデル及び桁橋モデルを用いる。2 自由度列車モデルを Fig. 2, 桁橋モデルを Fig. 3 にそれぞれ示す。Fig. 2 において、 $z_j$  及び  $\theta_j$  は車体の上下及び回転振動を表し、 $m_j$  及び  $I_j$  は車体の質量及び回転慣性モーメントである。また、 $k_j$  及び  $c_j$  は枕バネのばね定数及び減衰係数を表す。橋梁と列車との連成振動の定式化について、次のように示す。

#### 3. 1 車両の振動方程式

上下振動(Bouncing of car body)

$$m_j \ddot{z}_j + \sum_{l=1}^2 v_{jl}(t) = 0 \quad (1)$$

回転振動 (Pitching of car body)

$$I_j \ddot{\theta}_j + \sum_{l=1}^2 (-1)^l \lambda_{jl} v_{jl}(t) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $j$  は車両の番号、 $l$  と  $k$  は、車体と台車に関する変数、 $l = 1, 2$  はそれぞれ車体の前後、 $k = 1, 2$  はそれぞれの台車における前後軸を表す。また、 $v_{jl}(t)$  は車体と台車を連結する枕ばねの伸張を正として発生する力を表す。

$$v_{jl}(t) = k_j \left\{ z_j + (-1)^l \lambda_{jl} \theta_j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 w_{jlk} \right\} + c_j \left\{ \dot{z}_j + (-1)^l \lambda_{jl} \dot{\theta}_j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \dot{w}_{jlk} \right\} \quad (3)$$

上記の式において、 $w_{jlk}$  はレール変位と路面凹凸による車輪の変位を表す。

$$w_{jlk} = w(t, x_{jlk}) - z_0(x_{jlk}) \quad (4)$$

上式の  $w(t, x_{jlk})$  と  $z_0(x_{jlk})$  はそれぞれ車輪とレールとの接触点におけるレールの変位と凹凸を表す。また、列車の輪重  $P_{jlk}(t)$  は、次の式で計算される。

$$P_{jlk}(t) = \frac{1}{4} w_j + \frac{1}{2} w_{jt} + w_{jw} + \frac{1}{2} v_{jlk}(t) \quad (5)$$

ここで、 $w_j$ 、 $w_{jt}$  及び  $w_{jw}$  は、それぞれ車体、台車及び輪軸の重量である。

#### 3. 2 橋梁の振動方程式

有限要素及び振動理論により、形式によらず一般的な橋梁振動方程式は(6)式ようになる。(6)式において、 $M_b$ 、 $C_b$  及び  $K_b$  は、それぞれ質量、減衰、及び剛性マトリクスを表し、 $F_b$  は外力ベクトルである。

$$M_b \ddot{w}_b + C_b \dot{w}_b + K_b w_b = F_b \quad (6)$$

$$F_b = \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \Psi_{jlk}(t) P_{jlk}(t) \quad (7)$$

ここで、 $P_{jlk}(t)$  は輪重で、 $\Psi_{jlk}(t)$  は輪重を要素の節点に分配する分配ベクトルである。 $h$  は車両の数を表す。モード法を適用すると、橋梁の変位ベクトル  $w_b$  は固有振動ベクトルと一般化座標で表すと(8)式となる。

$$w_b = \sum_{i=1}^h \phi_i q_i = \Phi \cdot q \quad (8)$$

ここで、 $q$  は一般化座標で、マトリクス  $\Phi$  は固有ベクトル  $\phi_i$  で構成される。 $w_b$  を橋梁の振動方程式に代入すると(9)式になり、両辺に  $\Phi^T$  を乗じると(10)式で表わされる。

$$M_b \Phi \ddot{q} + C_b \Phi \dot{q} + K_b \Phi q = F_b \quad (9)$$

$$\Phi^T M_b \Phi \ddot{q} + \Phi^T C_b \Phi \dot{q} + \Phi^T K_b \Phi q = \Phi^T F_b \quad (10)$$

上記の式に固有ベクトル直交性を利用し、

$$\phi_i^T M_b \phi_i = M_i,$$

$$\phi_i^T K_b \phi_i = K_i,$$

$$\phi_i^T C_b \phi_i = C_i,$$

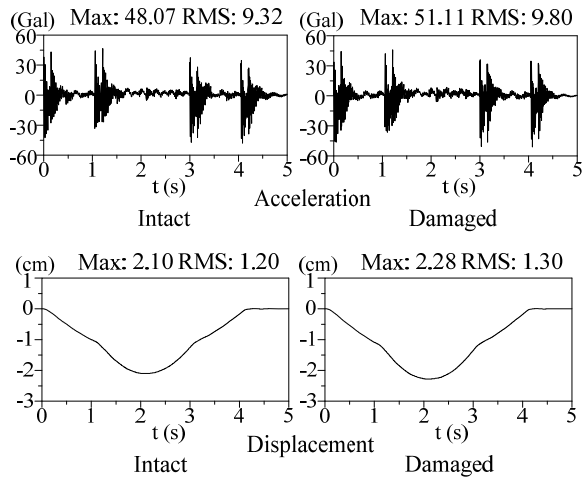


Fig. 4 Dynamic responses of the bridge (Node No.6)

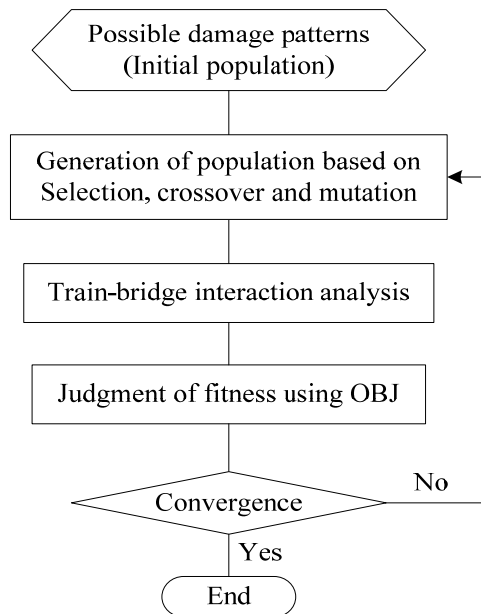


Fig. 5 Flow-chart of GA algorithm

Table 1 Definition of gene strings

Gene string	Damage degree (%)
000	0
001	10
010	20
011	30
100	40
101	50
110	60
111	70

$\Phi^T F_b = f_i$  とすると、一般座標に関する橋梁振動方程式は、次式ようになる。

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = f_i \quad (11)$$

上記すべての式を用いて代入し展開すると、さらに詳細式が得られ、計算機プログラム作成に用いられる。

### 3. 3 連成振動解析

前節で示したように定式化に基づき、振動系である車両との連成振動方程式を、Newmark's  $\beta$  逐次積分法を用いて計算機プログラムを開発し、動的応答解析を行う。このとき、 $\beta = 1/4$  とし、各時間間隔における収束判定は  $1/1000$  とする。

今回の解析において橋梁モデルは、Fig. 3 に示している平均的な諸元を有する鋼桁橋を想定し、11 節点、10 要素でモデル化している。車両は 1 両とし、速度は  $60\text{km/h}$  とする。

### 4. GA による損傷パターンの同定手法

遺伝的アルゴリズム (GA) は近年、探索・学習・最適化の技術的手法として、工学分野で注目されている。GA は自然界における生物の遺伝および進化の過程を繁殖・淘汰、遺伝子の交叉、及び突然変異等のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え、それを最適化手法として用いようとするものである。また、GA は得られた解の評価が可能であれば最適解を求めることができ、従来の最適化手法のように解の微係数、あるいは感度解析をする必要がない。工学的問題には最適解が必ずしも明確ではないが、評価は可能な問題は多数存在する。多数の離散値を有する最適化問題に GA を応用することは非常に有用であると考えられている<sup>3)-5)</sup>。そこで本研究では、GA を利用し、鉄道橋梁における部材損傷の程度およびその箇所の推定を行う。

## 5. 解析結果と考察

### 5. 1 損傷前後の橋梁振動応答

車両一両が桁橋を通過した際に、Fig. 3 で示した橋梁モデルの 6 番目節点について、健全時 (Intact) および 5 番要素の曲げ剛性を 28% 低減させた場合 (damaged) の加速度および変位時刻歴応答結果をそれぞれ Fig.4 に示す。ここで、

Table 2 Identification results by GA

Elem. No.	Case1		Case2		Case3	
	Pseudo-Measured	Analysis	Pseudo-Measured	Analysis	Pseudo-Measured	Analysis
1	0	0	0	0	11	10
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	11	10	46	50	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0

28%の損傷は動的変位の最も大きいスパン中央が疲労や腐食等により損傷が進行した状況を想定しているが、実構造物の損傷状況を正確にモデル化しているものではない。橋梁一車両連成振動解析プログラムでは、入力する曲げ剛性を変化させる（実質的に断面二次モーメントを低減させる）ことにより、損傷を表現することとする。結果の比較より、28%損傷時では健全時に比べると最大加速度および変位が増加することが確認できる。これは橋梁部材の剛性が低下したことが原因である。橋梁損傷時の動的応答は健全時のものと差異が現れ、損傷推定の指標となり得ることが分かる。

## 5. 2 損傷シナリオ

本研究では、桁橋中央部(Fig. 3, 節点 6)における加速度時刻歴応答結果を利用し、実測値と解析値の差が最小となる損傷パターンを見つけることで損傷推定を行う。ここで、事前に橋梁一走行列車連成振動解析により得られた損傷結果を擬似実測値として用いることとする。擬似実測値として想定するデータは、要素 5 を 11%損傷(以下, Case1), 46%損傷(以下, Case2), 要素 1 を 11%損傷(以下, Case3)させたものとする。Case1, Case2 は、最もたわみが大きく損傷しやすい要素 5 に着目し、前者は目視で判断できないような損傷、後者は比較的大きな損傷を想定し、本研究で構築した手法の有効性を示す。また、Case3 は測定位置

と損傷箇所が離れている状況を想定し、本研究で構築したモデルで特定可能かどうかを検証するために設定した。

## 5. 3 GA アルゴリズム

作成した GA 解析モデルのフローチャートを Fig. 5 に示す。このモデルでは、参考文献 3)で推奨されている値をキャリブレーションにより決定した、交叉率 60%、突然変異率 10%、初期集団個体数を 50 の単純 GA モデルを用いる。橋梁モデルの曲げ剛性を離散値パラメーターとして扱い、それぞれ 3 ビットの遺伝子列によってコード化し同定を行う。遺伝子列と離散値パラメーターを Table 1 に示す。ここで、上段の遺伝子列 (Gene string) に対し、下段に示す数値 (離散値) が橋梁一車両連成振動解析プログラムにおける要素の曲げ剛性の低下率 (Damage degree) として入力されるように設定した。また、GA においては目的関数 (OBJ) がしばしば問題となるが、本研究では実験値と解析値との 2 乗差の平均値が最小となることを想定し、式(12)で表す関数を用いて適応度を評価する。

$$OBJ = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \{f(i) - f'(i)\}^2 \quad (12)$$

ここで、 $f(i)$  は橋梁中央部 (Fig. 3, 節点 6) の擬似実測値の加速度時刻歴応答であり、 $f'(i)$ は連

成振動解析の解析値である。 $i$  は列車走行中の各時間ステップを表す。交叉については2点交叉法を用いる。収束条件はGAモデルの最適化の精度に大きく影響する。そこで、キャリブレーションを行った結果、世代における最良個体の目的関数の値が $10^{-6}$ になったときに収束するものとした。

#### 5. 4 損傷同定結果

前述GAアルゴリズムにより収束計算を行った結果、Table 2のような結果が得られた。Case1, Case2 および Case3 とともに実測値と最も近い値を与える損傷パターンにおいて収束した。これにより、簡易的なモデルを使用しているとはいえ、本研究で用いる手法と目的関数により損傷箇所およびその程度を十分に推定できることが確認できた。

##### 5. 4. 1 収束時間の検討

収束までGAにおいてCase1は13世代、Case2は157世代、Case3は12世代を要した。これらの差は損傷が大きな値であるほど、局所解に陥りやすいことが原因であると考えられる。また、GAのパラメーター（個体数、交叉率、突然変異率）を変化させると10~30世代程であるが収束までに要する時間が変化する。GAにおいてはパラメーター設定が収束の可否、時間に大きく影響するといえ、最適なものに設定する必要がある。

##### 5. 4. 2 収束精度の検討

今回は収束条件をキャリブレーションにより目的関数が $10^{-6}$ 以下となるときに収束と判定したが、条件を $10^{-6}$ 以上にしたときは、Case2において最も近い値に収束しなかった。一方、収束条件を過剰に小さい値にしてしまうと、求めたい解をGAモデルで推定できているが収束しないという結果に陥る可能性がある。そのために、今後複雑な構造および車両モデルを用いる際に、収束条件の設定について細心に検討する必要があると考える。また、精度向上のためにビット数を増し離散値パラメーターを細かくする必要がある。

#### 6. 結論

本研究では、橋梁-車両連成振動解析プログラムを構築すると共に、GA最適化手法を用いて交通振動順解析手法による橋梁構造物の損傷推定手法の適用可能性を検討した。その結果、簡単な構造および列車モデルを用いた場合、提案した手法は高い精度で橋梁における損傷部材の位置およびその程度を特定することが可能であった。

今後の実用化に向け、より現実に近い詳細な三次元モデルを用いた損傷推定、また提案手法実用化するためのニューラルネットワークシステムの構築が必要になる。その際、次の諸問題が想定され、適切に対応する必要が予想される。

1) 実構造物の構造形式が複雑になり部材数も多く、損傷程度も考えると、損傷パターンが複雑で膨大になる。闇雲に損傷パターンを与えて動的連成振動解析またNNの学習・GA最適化を実施するのは、非効率のだけでなく、推定精度にも影響する。実際の鉄道高架橋の損傷箇所・程度については、経験的に実務者は把握しており、また工学的あるいは力学的にもある程度予想できる。あり得る損傷パターンの効率的な設定および損傷推定精度を確保するために、事前に実際の鉄道高架橋の損傷箇所・程度を調査し、損傷による橋梁動的応答の変化傾向を把握する必要がある。

2) 本論文で用いた加速度振動応答だけで損傷パターンを区別できなくなる可能性がある。その場合、振動応答に加え、周波数応答特性などより複雑な目的関数を設計する必要がある。

3) 計算量が膨大になりパソコンでの計算は現実的でなくなる可能性があり、より効率的な計算方法の開発や適用の必要性がある。

4) 鉄道における橋梁形式および列車構造が特定区間において一定であるが、乗員数により列車重量変化の影響が存在する。ここで、感度解析を行い、必要であれば、列車の重量の影響もNNの入力として設定する必要がある。

5) 損傷推定精度を高めるために、より高度なNNおよびGA手法の適用が必要である。

#### 【参考文献】

- 1) Doebling, S.W. et al.: A summary review of vibration-based identification methods, Shock and Vibration Digest, Vol.205 (5), pp.631-645, 1998.
- 2) 吉田幸司, 関 雅樹, 曾布川竜, 西山誠治, 川谷充郎: 鉄道高架橋の部材剛性低下による振動特性への影響評価, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.447-458, 2005.3.
- 3) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社出版局.
- 4) 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平: パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版.
- 5) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書.