

鋼道路橋の疲労亀裂に対する補修・補強方法の類推推論選定システム

Analogical Reasoning System to Select Repair and Retrofit Methods
for Steel Bridge Fatigue Cracks

田中成典*・三上市蔵**・前田秀典***・小林篤司****

Shigenori TANAKA, Ichizou MIKAMI, Hidenori MAEDA, and Atsushi KOBAYASHI

*工修 関西大学専任講師 総合情報学部 (〒569-11 高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)
 **工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)
 ***工修 (株)東洋情報システム (〒564 吹田市江坂町1丁目13番33号)
 **** 関西大学大学院博士課程前期課程 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

We have studied some diagnostic knowledge-based expert systems combined the case-based reasoning with the rule-based reasoning to select the repair and retrofit methods for fatigue cracks on steel bridges. It is, however, difficult to produce analogical inference results from a case-based database or a knowledge-base because these systems have no function for reasoning analogical results.

In this study, we discuss the method for introducing an analogical reasoning process into the previous system, by using the genetic algorithm as realizing analogical mechanism. Then, we design a idea to optimize the analogical inference results using the domain knowledge, and discuss about the contents of domain knowledge. We expand the previous system by using analogical mechanism of the genetic algorithm. Finally, it is found that this present system is efficient from the inference results.

Key Words : *Knowledge-based Expert System, Fatigue Crack of Steel Bridge, Repair and Retrofit Method, Analogical Reasoning, Genetic Algorithm*

1. まえがき

著者らは、鋼道路橋の疲労亀裂に対する補修・補強方法を選定するための診断型知識ベースエキスパートシステムを構築してきた^{1)~4)}。文献1)2)では、専門家から獲得した知識をルールとして用いて推論を行うルールベース推論 (Rule-Based Reasoning:RBR) 手法、文献3)では、過去の事例に専門家の知識が含まれるとして事例に基づく推論を実行する事例ベース推論 (Case-Based Reasoning:CBR) 手法、文献4)では、CBRとRBRを併用した手法で、それぞれシステムを構築した。その結果、CBRやRBRをそれぞれ単独で用いたシステム^{1)~3)}よりも、併用したシステム⁴⁾の方が、類推結果を含んだ望ましい推論結果を導き出せることが分かった。

しかし、既存システム⁴⁾の類推機能は、事例データやルールの数が増すほど精度が良くなるが、どのくらいのデータ数が妥当であるか判断することは難しい。よって、通常、人間が行っている類推推論 (Analogical Reasoning:AR) の機能を既存システム⁴⁾に採り入れる必要がある。そこで、著者らは、既存システム⁴⁾の推論機構に類推推論機能を採り入れる方法を検討⁵⁾した。そこでは、類推推論を実現するために誘導類推手法と遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) 手法について検討した。さらに、類推推論を遺伝的アルゴリ

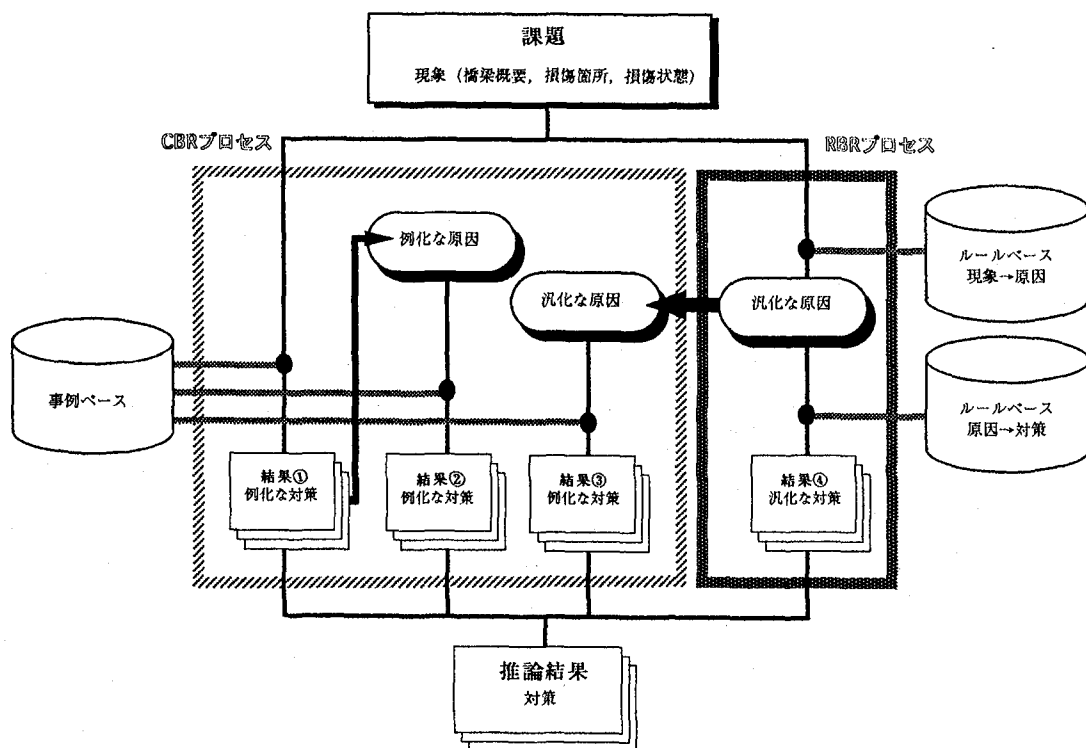
ズム手法を用いて実現する方法を考案し、既存システム⁴⁾に組み込むための基本構想を検討した。

本研究では、類推推論を用いて鋼道路橋の疲労亀裂に対する補修・補強方法を選定するシステムを構築する。まず、既報⁵⁾の研究を基に、類推推論の基本構想を確立する。さらに、システム構築に必要な詳細設計を行い、類推推論システムを開発する。この開発したシステムを実橋の損傷事例に適用し、既存システム⁴⁾の推論機構で得られる結果と比較して、類推推論機能の効果と本システムの有効性を検証する。

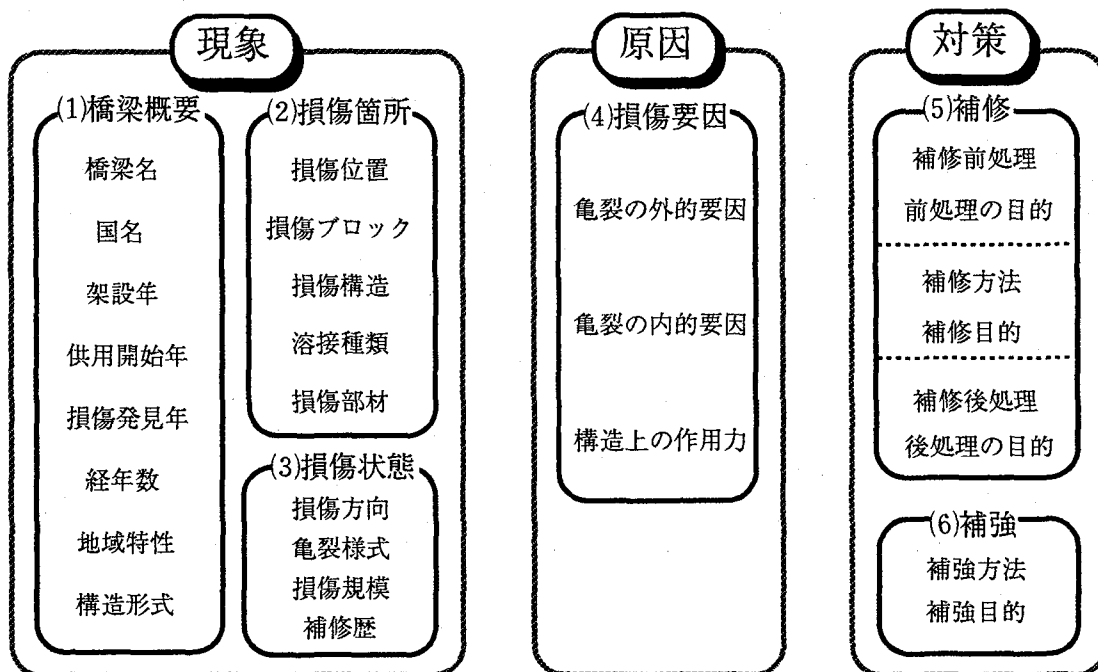
2. CBRとRBRの併用システム

CBRとRBRの併用システム⁴⁾の推論手順を図-1に示す。このシステムでは、鋼橋に発生した疲労亀裂の現象 (図-2の(1)-(3)) を課題として入力すると、その対策 (図-2の(5)(6)) として四種類の推論結果 (図-1の結果①~④) が導き出され、それらから最終的な推論結果が絞り込まれる。結果①と結果②は、CBR手法のみを用いた推論結果、結果③は、CBRとRBR手法を適用した推論結果、そして、結果④は、RBR手法のみを用いた推論結果である。ここで、結果②と③は、原因 (図-2の(4)) も考慮された推論結果である。

既存システム⁴⁾では、疲労亀裂の現象、原因、対策の各項目 (図-2) を次のように定義している。



図－１ 既存システムの検索プロセス



図－２ 考慮する属性

- (1) 橋梁概要 … 橋梁の名前や構造形式などの一般的な属性のグループ
- (2) 損傷箇所 … 損傷の位置や部材などを表す属性のグループ
- (3) 損傷状態 … 損傷の方向や規模などの状態を表す属性のグループ
- (4) 損傷要因 … 損傷と因果関係のある外的要因と内的要因および作用力を表す属性

- (5) 補修 … 損傷に対する補修方法とその目的を表す属性のグループ
- (6) 補強 … 損傷に対する補強方法とその目的を表す属性のグループ

既存システム⁴⁾は、推論過程(図－１)において、現象から事例に基づく事実としての原因、つまり例化な原因と、ルールに基づく一般的な原因、つまり汎化な

原因とを推定して、原因を除去するための対策（結果②と③）を類推する機能を保持している。しかし、このシステムも、事例ベース推論では解が絞り切れなくて、そしてルールベース推論で対応できない課題が入力された場合、システムの利用者を満足させる類推結果を導き出せない。また、この類推推論機能は、事例データやルールの数が増すほど精度が良くなり威力を発揮する。しかし、どの段階で事例データとルール数が充実しているか判断することが難しい。そのため、類推推論機能をさらに充実させるために、新たに類推推論機構をシステムに組み込む必要がある。

3. 類推推論の基本構想

類推推論の手法には、まず、新たな課題に類似した過去の課題を検索し、次に、過去の課題と過去の解との関係からプロセス（手続き）を抽出し、そして、新たな課題に対してそのプロセスを写像することによって新たな解を導き出して問題解決を行う誘導類推⁶⁾がある。しかし、本研究で対象としている問題領域では、複数の専門技術者の関係や手続きなどの知識を統合させることは難しく、たとえプロセスを作り上げたとしても、それを写像することによって導き出された解の信頼性を評価する手だてがない、などの問題が残る。そこで、既報⁵⁾の研究において、遺伝的アルゴリズム手法を応用して類推推論機能を実現するための基本構想を検討した。

生物の進化原理に着想した遺伝的アルゴリズム⁷⁾⁸⁾は、最近、最適問題に対して、最適ではないがそれに準ずるものを探索する手法として注目されている。土木分野においては、杉本によるトラス構造物の最適設計問題に遺伝的アルゴリズムを適用した研究⁹⁾が最も古く、それ以後、仮設鋼矢板締切工の設計支援¹⁰⁾、構造物の最適設計支援¹¹⁾、道路整備順位決定支援¹²⁾、骨組み構造物を対象とした遺伝的アルゴリズムのパラメータの効果¹³⁾、連続桁 RC 床版の打設順序支援¹⁴⁾、橋梁の補修計画支援¹⁵⁾などの数多くの研究が報告されている。

本研究では、既存システム⁴⁾に類推推論機能（AR プロセス）を付加する方法を検討し、図-3の構成を考案した。AR プロセスでは、まず、既存システムの推論結果のうち同じ事例データ形式の結果（図-3の①～③）を入力項目としてコード化し、遺伝子配列の初期集団として形成する。この母集団の収束を判定するために、集団の遺伝子配列ごとの適応度を計算する。この計算には、問題領域に依存した知識を用いる。この知識を条件知識と呼ぶ。ここで、本システムの各プロセスの役割は、次のようである。

・CBR プロセス：損傷の現象から事例ベースを検索して類似事例を導く。そして、それらを AR プロセスの初期集団として採用する。

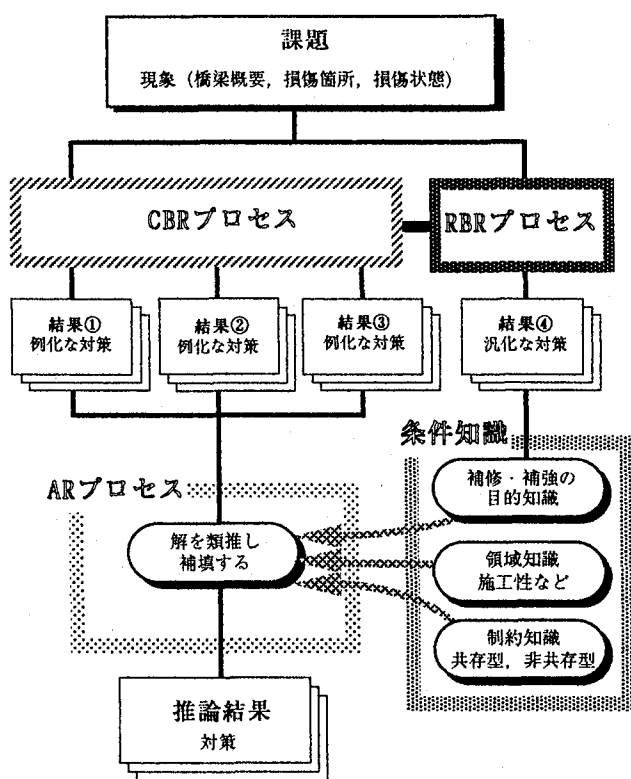
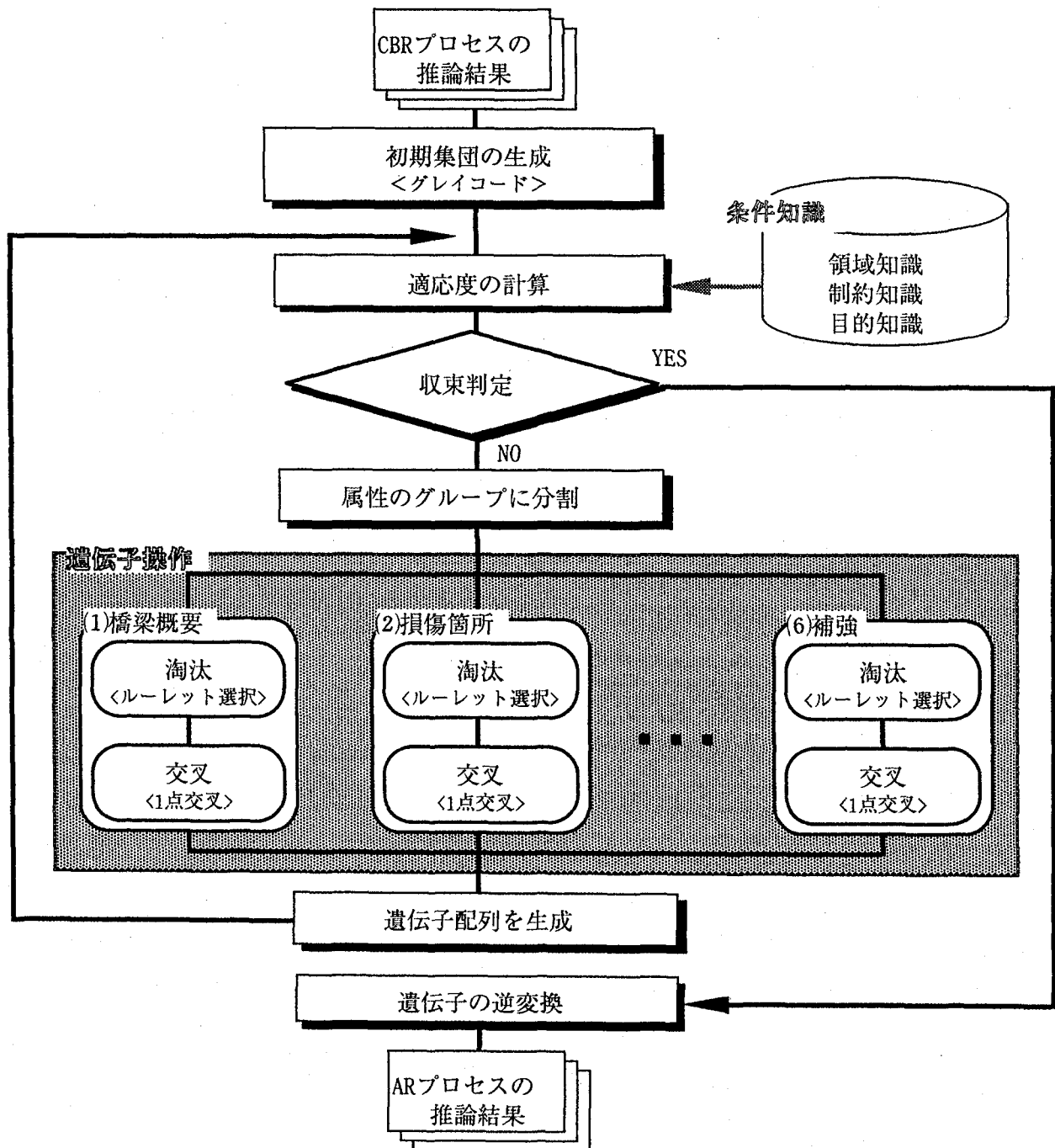


図-3 システムにおける類推推論の実装

- ・RBR プロセス：現象からルールベースを適用して原因を追求し、そして補修・補強方法と、その目的を導く。そこで、その目的を AR プロセスの条件知識として採用する。
- ・AR プロセス：CBR プロセスで得られた推論結果を遺伝子配列の初期集団とする。評価関数は、RBR プロセスで得られた目的知識と、ドメインに依存した領域知識および制約知識から構成する。最終的には、図-3に示す三種類の条件知識を用いて準最適化された推論結果を導き出す。

4. システムの詳細設計

AR プロセスの処理手順は図-4のように考える。まず、CBR プロセスの推論結果を入力して、遺伝子配列の初期集団を生成する。次に適応度の計算を条件知識を用いて実行し、収束判定を行う。そして、収束しなければ遺伝子操作を実行する。この遺伝子操作を属性の各グループ（図-2の(1)～(6)）にまたがって実施するとグループ分けの意味が失われるため、遺伝子操作は属性の各グループ内で行う。遺伝子操作を終了すると次世代の遺伝子配列が生成され、再び適応度を計算し、収束するまで何世代も同じ操作を実行する。収束すれば遺伝子配列を逆変換し、準最適化された解を出力する。個々の処理内容については、以下の各節で詳細に記述する。



図ー4 AR プロセスの処理手順

4.1 初期集団の生成

遺伝子化については、次の二種類の方法を使い分ける。

- (i) CBR プロセスの推論結果に付随する属性 (現象に関する属性) を遺伝子化する場合
- (ii) CBR プロセスで推定された属性 (原因と対策に関する属性) を遺伝子化する場合

既存システムの推論結果を変化させても比較的問題が少ない現象に関する属性 (橋梁概要, 損傷箇所, 損傷状態) には, (i) の方法を適用する。ただし, 橋梁概

要のうち事例データに固有の属性 (橋梁名, 国名, 架設年, 供用開始年, 損傷発見年) は, 遺伝子操作の意味がないので遺伝子化しない。また, 既存システムにより解空間が絞り込まれている原因と対策に関する属性 (損傷要因, 補修, 補強) には, (ii) の方法を適用する。

遺伝子配列のコーディング方法としては, グレイコード⁸⁾を採用する。この方法を用いると, 似かよった遺伝子間で交叉 (遺伝子操作の一種) を行ってもどちらの遺伝子配列も大きく変化しないため, 近傍の探索に有効

である。

図-2の各属性について、表-1のように属性値の種類を限定し、遺伝子長を決定した。以下にその結果をまとめる。

(1) 橋梁概要 (遺伝子長は計 10bit)

- (a) 経年数 : 5 種類 (3bit)
- (b) 地域特性 : 4 種類 (2bit)
- (c) 構造形式 : 18 種類 (5bit)

(2) 損傷箇所 (遺伝子長は計 22bit)

- (d) 損傷位置 (橋軸方向) : 9 種類 (4bit)
ただし、*は、損傷位置が端支点であるか、中間支点であるかが不明な場合に用いる。
- (e) 損傷ブロック : 28 種類 (5bit)
##*は、その右の項のいずれかが入ることを意味している。
- (f) 損傷構造 : 46 種類 (6bit)
##*は、その右の項のいずれかが入ることを意味している。
- (g) 溶接種類 : 3 種類 (2bit)
ただし、#は溶接からの亀裂以外の時に用いる。
- (h) 損傷部材 : 19 種類 (5bit)
ただし、溶接上とは、属性 (g) の溶接種類で得られている溶接に亀裂が発生した場合である。

(3) 損傷状態 (遺伝子長は計 9bit)

- (i) 溶接方向に対する亀裂方向 : 3 種類 (2bit)
- (j) 亀裂様式¹⁾ : 12 種類 (4bit)
ただし、同時に亀裂の入った溶接線の方向を示す。
- (k) 損傷規模 : 3 種類 (2bit)
- (l) 補修歴 : 2 種類 (1bit)

(4) 損傷要因, 補修, 補強

これらの属性については、推論結果 (図-3の結果①~③) に含まれる属性値の種類だけ遺伝子化する。よって、システムを実行する際に、動的に遺伝子長を計算する。ここで、システムで用いる補修・補強方法の属性値を表-2の左欄に示す。

4.2 適応度の計算

遺伝子配列の母集団を評価するために、条件知識を用いて適応度を計算する。AR プロセスでは、次の条件知識を用いる。

(1) 領域知識

領域知識¹⁶⁾は、実際の補修・補強の対策を決定するために必要な知識である。ここでは、以下のようなものを考える。

- ・施工性 … 交通規制の有無, 作業空間の確保, 仮支柱などの支保工の設置の有無, 工期などの施工上の考慮しなくてはならない知識

- ・経済性 … 工法の違いによる経済性の度合を表す知識
- ・美観性 … 高力ボルトよりも再溶接の補修方法を採用した方が美観性が高い, など美観上で考慮しなくてはならない知識

そこで、補修・補強方法に対する領域知識を表-2のように整理した。表中の5段階の重みを次のように定義した。

①施工性

- ・交通規制 ; 1点:全面規制, 2点:片面規制, 3点:一部規制, 4点:規制した方が良い, 5点:必要無

- ・工期 ; 1点:長期, 2点:比較的長期, 3点:中期, 4点:比較的短期, 5点:短期

- ・支保工 ; 1点:ぜひ必要, 2点:必要(大), 3点:必要(中), 4点:必要(小), 5点:必要無

- ②経済性 ; 1点:悪い, 2点:比較的悪い, 3点:どちらでもない, 4点:比較的良い, 5点:良い

- ③美観性 ; 1点:悪い, 2点:比較的悪い, 3点:どちらでもない, 4点:比較的良い, 5点:良い

(2) 制約知識

制約知識¹⁷⁾は、共存型制約と非共存型制約が考えられる。共存型制約とは、たとえば、ある補修方法とある補強方法は同時に採用しなくてはならない、と言った制約知識、一方、非共存型知識とは、同時に採用できない、と言った制約知識である。本研究では、制約知識を次の二種類に限定する。

- ・ある属性の属性値間に生じる非共存型制約
- ・属性間に生じる共存, 非共存型制約

前者は、外的要因, 内的要因, 補修・補強方法の属性が対象となる。一方、後者は、構造形式と損傷箇所の属性間などが対象となる。

前者においては、内的要因に対する制約知識を表-3のように獲得した。ここで、表中の×印は非共存型制約知識を表している。これは、たとえば、1次応力の応力集中と2次応力の応力集中が、同時に共存できないという知識である。ただし、1次応力の応力集中は単に、応力集中とする。同様に、補修・補強方法に対する制約知識を表-4のように獲得した¹⁷⁾。また、後者においては、構造形式と損傷箇所の制約知識を表-5のように獲得した。

非共存型制約は、遺伝子が淘汰されるように適応度を下げる役目に、一方、共存型制約は、適応度を上げる役目に用いられる。

(3) 目的知識

既存システムの推論結果 (図-3の結果④) から得ら

表－1 属性の一覧

(1) 橋梁概要						
(a) 経年数		0～5	6～10	11～15	16～20	20～
(b) 地域特性		水辺部	山間部	都市部	河口部	
(c) 構造形式		プレートガーダー橋	ガルバー プレートガーダー橋	合成プレートガーダー橋	ガルバー 合成プレートガーダー橋	格子プレートガーダー橋
		格子 合成プレートガーダー橋	格子ガルバー 合成プレートガーダー橋	格子 非合成プレートガーダー橋	格子ガルバー 非合成プレートガーダー橋	箱桁橋
		ガルバー箱桁橋	アーチ橋	上路アーチ橋	タイドアーチ橋	ランガー橋
		ローゼ橋	吊橋	斜張橋		
(2) 損傷箇所						
(d) 損傷位置 (橋軸方向)		支間中間部	支間中間部 (負モーメント域)	中間支点上	中間支点付近	端支点上
		端支点付近	*支点上	*支点付近	ガルバーのヒンジ付近	
(e) 損傷ブロック	主桁と###の連結部	横桁	横構	対横構	ダイヤフラム	ブラケット
	主桁と###の交差部	横桁				
	主桁と###の貫通部	横桁				
	主桁の###部	継手	切欠き			
	横桁と###の連結部	タイ桁	主構			
	横桁と###の交差部	縦桁				
	補剛桁と###の連結部	横桁	支材			
	アーチリブと###の連結部	横桁	支材			
	ブラケットと###の連結部	標識柱				
	下弦材と###の連結部	横桁				
(f) 損傷構造	###取付部	カバープレート	コーナープレート	ソールプレート	吊材	
	###部	主桁	腹板ギャップ	ハンガー	吊材端	タイ材の継手
	主桁上フランジと###	ガセットプレート	主桁腹板	ブラケット		
	主桁下フランジと###	カバープレート	ソールプレート	ダイヤフラム	橋脚横梁	主桁下フランジ
		主桁腹板	垂直補剛材			
		主桁腹板	垂直補剛材			
	横桁フランジと###	横桁腹板				
	横桁上フランジと###	横桁腹板	主桁腹板			
	横桁下フランジと###	主桁腹板				
	横桁腹板と###	ガセットプレート	縦桁下フランジ			
	横構と###	ガセットプレート				
	縦桁腹板と###	山形鋼				
	補剛桁上フランジと###	ガセットプレート				
	補剛桁下フランジと###	ガセットプレート				
	補剛桁腹板と###	補剛桁上フランジ	主構上弦材			
	水平補剛材と###	水平補剛材				
	対横構と###	ガセットプレート				
	吊材腹板と###	吊材フランジ				
	添接板と###	高力ボルト				
	アーチリブと###	ガセットプレート	支材	垂直補剛材		
	アーチリブ腹板と###	横桁上フランジ				
	ガセットプレートと###	上弦材	下弦材	垂直補剛材		
	コネクションプレートと###	補剛材				
	タイプレートと###	タイプレート				
	ダイヤフラムと###	コーナープレート				
	ダイヤフラムフランジと###	ダイヤフラム腹板				
	ダイヤフラム腹板と###	コーナープレート				
	トラフリブと###	トラフリブ				
	ブラケット上フランジと###	ブラケット腹板	標識柱			
	その他	ピンプレート				
(g) 溶接種類	ノ	隅肉溶接	グループ溶接	#		
(h) 損傷部材	主桁上フランジ	主桁下フランジ	主桁腹板	横桁腹板	縦桁下フランジ	
	縦桁腹板	補剛桁上フランジ	補剛桁腹板	アーチリブ腹板	溶接上	
	垂直補剛材	連結板	高力ボルト	吊材腹板	ダイヤフラム腹板	
	ガセットプレート	トラフリブ	ハンガープレート	ブラケット上フランジ		
(3) 損傷状況						
(i) 溶接方向に関する亀裂方向		垂直	平行	斜め		
(j) 亀裂様式	亀裂様式(a)	亀裂様式(b)	亀裂様式(c)	亀裂様式(d)	亀裂様式(e)	
	亀裂様式(f)	亀裂様式(g)	亀裂様式(h)	亀裂様式(i)	亀裂様式(j)	
	亀裂様式(k)	亀裂様式(l)				
(k) 損傷規模	大	中	小			
(l) 補修歴	有	無				

れた補修・補強の目的を知識として用いる。これは、遺伝子配列の補修・補強の目的と照らし合わせ、一致しておれば適応度を上げる役目に用いる。

以上の三種類の条件知識を各遺伝子配列に適用して適応度を計算する。その計算式を次のように考案した。

$$A = C(A_0 + \alpha_1 D + \alpha_2 O)$$

ただし、

A_0 : 前世代の適応度

D : 領域知識による評価値

C : 制約知識による評価値

O : 目的知識による評価値

α_1, α_2 : 重み係数

ここで、非共存型制約知識に引っ掛かった遺伝子配列

表－２ 領域知識

補修・補強の方法	施工性				経済性	美観性
	規制有無	工期	支保工	スペース		
ガウジング	5	5	5	5	5	5
グラインダ	5	5	5	5	5	5
ストップホール	5	5	5	5	5	4
再溶接	5	3	5	4	4	5
再溶融	5	3	5	4	4	5
ピーニング	5	5	5	5	5	5
切り抜き	5	4	4	4	4	4
主桁の交換	1	1	1	1	1	5
ガセットプレートの交換	2	2	3	3	2	4
連結板の交換	2	2	3	3	2	4
ハンガーの交換	2	3	3	3	2	4
高力ボルトの交換	5	4	4	4	3	4
ブラケットの交換	2	3	2	2	2	4
支承の交換	1	2	1	1	2	4
ソールプレートの交換	2	2	1	4	2	4
主桁の形状変更	3	3	1	1	3	5
高力ボルト	5	4	5	4	4	3
高力ボルトを用いた添接板	5	2	5	3	3	2
溶接を用いた添接板	5	2	5	3	3	5
高力ボルトを用いた補剛材付き添接板	5	2	5	3	3	2
新補剛材の設置	4	2	5	3	3	3
TIG処理	5	4	5	4	5	4
ガセットプレートの増厚	4	2	4	3	3	5
ソールプレートの増厚	2	2	2	3	2	5
補強リブの増厚	4	4	5	4	3	4
垂直補剛材の増厚	5	2	5	3	3	4
ケーブルによる吊材相互の緊結	4	3	5	3	4	4
丸太による吊材相互の緊結	5	4	5	3	5	1
スカーラップの穴埋め	5	4	5	4	5	4
腹板ギャップの増大	2	2	3	3	3	4
対傾構のガス切断	5	3	5	4	4	4
連結ボルトの除去	5	5	5	5	5	5
コーナプレート撤去	5	4	5	3	3	3
腐食生成物の除去	5	5	5	5	5	5
横桁フランジと縦桁の連結	2	4	3	2	4	5
横桁フランジとダイヤフラムの連結	2	4	3	2	4	5
主桁フランジとダイヤフラムの連結	2	4	3	2	4	5
主桁フランジと横桁の連結	2	4	3	2	4	5
主桁フランジと対傾構の連結	2	4	3	2	4	5
主桁フランジと補剛桁の連結	2	4	3	2	4	5
アーチリブフランジと横桁の連結	2	4	3	2	4	5
制振装置の設置	1	1	2	2	1	4
ピン結合に変更	1	2	2	2	1	5
横桁の取付	2	2	2	1	1	1
カバープレートの溶接取付	2	3	2	3	3	5
桁内の補強部材の取付	4	2	5	3	3	4
縦桁の増桁	2	2	2	1	1	2
挿入板	5	4	4	4	4	4

表－３ 内的要因に関する非共存型制約知識

内的要因	1	2	3	4	5	6
1：応力集中		×	×	×		×
2：2次応力の応力集中	×		×	×		×
3：応力集中による座屈2次応力	×	×		×		×
4：2次応力	×	×	×			×
5：残留応力						×
6：不明	×	×	×	×	×	

表一 4 補修・補強方法に関する非共存型制約知識

[illegible]

を淘汰するために、適応度を著しく下げることを配慮した。適応度の初期値は、CBRプロセスによって得られた事例データに対する類似度を用いることとする。

4.3 収束判定

収束判定では、その世代の適応度の最小自乗近似させた場合の傾きが、前に遡る5世代の間で0.1%以下の変化しかしない、という条件を考える。この条件を満足しなければ、条件が満たされるまで世代交代を繰り返す、条件が満足されれば、4.5節の遺伝子配列の逆変換

の処理に移る。

4.4 遺伝子操作

遺伝子操作は、属性の各グループ(図-2の(1)~(6))内で適用する。

(1) 淘汰

遺伝子配列の淘汰の方法は、ルーレット選択⁸⁾を採用する。ただし、同じ内容の遺伝子配列が複数個存在している場合、その個数と各遺伝子の適応度の大きさが、ルーレット選択の確率に影響を及ぼす。たとえば、適

表-5 構造形式と損傷箇所の属性との非共存制約知識

構造形式		プレートガーダー橋	ゲルバープレートガーダー橋	合成プレートガーダー橋	ゲルバー合成プレートガーダー橋	格子プレートガーダー橋	格子合成プレートガーダー橋	格子非合成プレートガーダー橋	格子ゲルバー合成プレートガーダー橋	箱桁橋	ゲルバー箱桁	アーチ橋	上路アーチ橋	タイドアーチ橋	ランガー橋	ローゼ橋	吊橋	斜張橋	トラス橋
損傷箇所	属性値																		
損傷位置	ゲルバーのヒンジ	×		×		×	×		×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
損傷ブロック	補剛桁	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×								
	コーナープレート	×	×	×	×	×	×	×	×										
	アーチリブ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						×	×	×
	タイ材	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						×	×	×
	主構	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
	ハンガー	×		×		×	×		×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
	吊材	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×					×
	下弦材	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
損傷構造	アーチリブ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						×	×	×
	コーナープレート	×	×	×	×	×	×	×	×										
	ピンプレート	×		×		×	×		×						×		×	×	×
損傷部材	ハンガープレート	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
	アーチリブ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						×	×	×

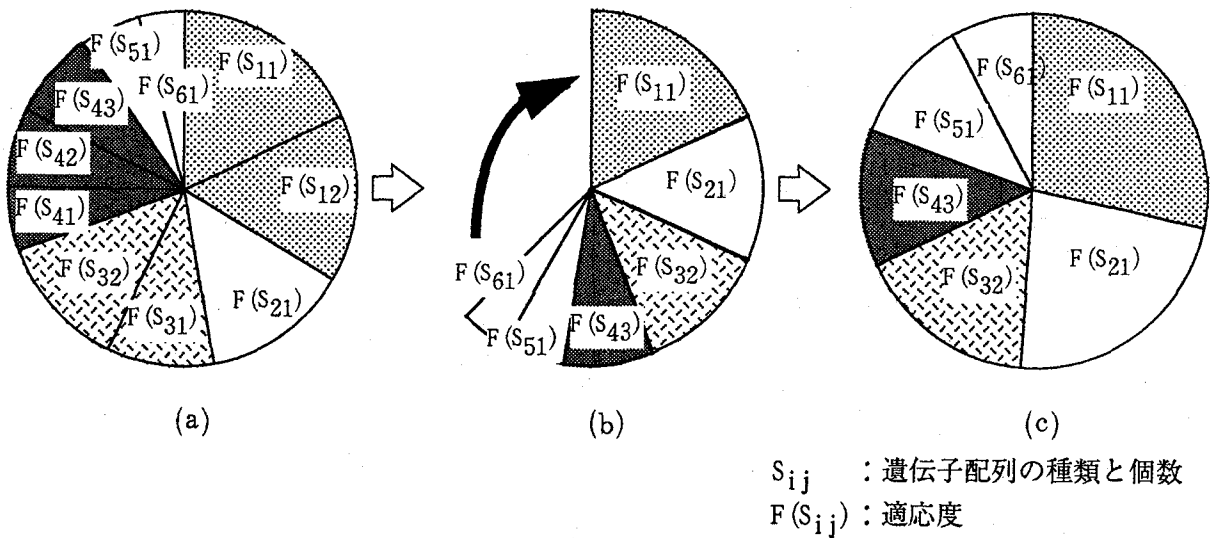


図-5 シェアリングの方法

応度の低い遺伝子配列が複数個存在する場合、その遺伝子配列の選択確率が複数倍されてしまい、ルーレット選択確率が上がり、遺伝子操作の収束効率が低下する。そこで、各遺伝子間に公平にルーレット選択を適用するために図-5に示すシェアリング⁸⁾の方法を考案した。ここで、図中の*i*は遺伝子配列の種類を、*j*は個数を表す。まず、全種類の全個数の適応度をルーレット上に展開(図-5(a))する。次に、全種類とも適応度が最も高い一つの遺伝子のみ抽出(図-5(b))する。そして、それらをルーレット上に各比率ごとに展開(図-5(c))する。この手法によって、適応度の高い遺伝子の選択確率を上げることができる。

(2) 交叉

交叉の方法は、それぞれの属性のグループにおいて、一点交叉⁸⁾を採用する。しかし、母集団の遺伝子配列としては、多点交叉を行っていることになる。

(3) 突然変異

本システムでは、突然変異を実行するとCBRやRBR手法プロセスで絞り込まれた推論結果を用いる意味がなくなるため、突然変異の処理は施さない。

4.5 遺伝子配列の逆変換

収束した世代の遺伝子配列をグレイコードから元の事例に変換し、ARプロセスの推論結果として出力する。

5. システムの実行

実橋に発生した損傷事例を用いて本システムの妥当性を検証してみる。例として、Yellow Mill Pond 橋¹⁸⁾の損傷を採り上げる。Yellow Mill Pond 橋は、架設から13年、16年、24年目の三度にわたって、主桁下フランジのカバープレート取付部において、フランジとカバープレートの溶接部に亀裂が発生した。ここでは、1981年に補修された三度目の疲労亀裂を対象に、本システムを実行した。

入力項目(表-6の課題欄網かけ部)は次のようである。

(1) 橋梁概要

- ・経年数 : 20~年
- ・構造形式 : 格子合成プレートガーダー橋

(2) 損傷箇所

- ・損傷ブロック : カバープレート取付部
- ・損傷構造 : 主桁下フランジとカバープレート
- ・溶接種類 : 隅肉溶接
- ・損傷部材 : 溶接上

(3) 損傷状態

- ・損傷方向 : 平行
- ・亀裂様式¹⁾ : 亀裂様式(i)

CBRプロセスとRBRプロセスの段階で得られた推論結果を表-6(事例1~7とRBR欄)に示す。この結

果には、実橋で採用された補修方法(ピーニング)と補強方法(高力ボルトを用いた添接板)が推論されている。その他、補修方法では、連結板の交換や再溶接、再溶融が、補強方法では、対傾構のガス切断、連結ボルトの除去が得られた。これら種々の工法から、最も望ましい工法の組み合わせを類推させる。

そこで、CBRプロセスの推論結果(表-6の7つの事例)をARプロセスに与え、類推推論を実行した。GAのパラメータとしては、適応度の計算の重み係数と交叉確率があるが、重み係数は、 $\alpha_1 = 0.05, \alpha_2 = 0.1$ 、交叉確立は0.3とした。その結果、表-7に示す推論結果が得られた。補修方法として"ピーニング"、補強方法として"高力ボルトを用いた添接板"が最も望ましい工法として得られた。これは、実橋で適用された補修・補強方法と一致している。したがって、CBRプロセスとRBRプロセスによる推論結果にARプロセスを適用すれば、最も望ましい解を類推できることが確認できた。

なお、補強方法において、対傾構のガス切断、連結ボルトの除去、高力ボルトを用いた添接板の併用が一つの解として類推されている。これは適当とは言えないが、表-4の補修・補強方法の非共存型制約知識が十分に獲得されていないためである(表-4の網掛け部)。この網掛け部の知識が獲得できれば、このような組み合わせは淘汰されると考えられる。

この例題では、GAの探索は、わずか7世代で収束した。これは、局所解に陥ったのではなく、CBRとRBRプロセスの併用システムによって解空間が限定されたためであると考えられる。つまり、初期世代の選定というGAの課題が、エキスパートシステムから得られた解を、その初期世代に置き換えることによって解消できたことになる。

6. あとがき

本研究では、CBRとRBRの併用システム⁴⁾が抱えている推論機構の問題点を解決するために、遺伝的アルゴリズム手法を用いた類推推論機能を実装した。まず、既存システムの推論機構の課題について述べ、類推推論機能を充実させる必要性を論じた。そして、類推推論を実現するための遺伝的アルゴリズム手法を用いた基本構想をまとめ、この構想に基づいて必要な項目を検討し、定義付けした。さらに、定義した仕様に基づいてシステムを構築した。最後に、実橋の損傷事例を本システムに入力した結果、既存システムでは絞りきれない解を最適化することが可能になった。

本システムの今後の課題としては、5章で述べたように制約知識を獲得すること、さらに、ARプロセスに突然変異の操作を採り入れることにより、CBRとRBRプロセスで得られた解から内挿するだけでなく、外挿できるシステムに拡張することが考えられる。

表-6 CBR プロセスと RBR プロセスから得られた実行結果

属性 事例	現象/橋梁概要							
	橋梁名	国名	架設年	供用開始年	損傷発見年	経年数	地域特性	構造形式
1	東名高速道路	日本	不明	1969	不明	不明	不明	プレートガーダー橋
2	Lehigh River and Canel 橋	米国	1953	1953	1972	16~20	水辺	プレートガーダー橋
3	橋梁名不明	日本	不明	不明	不明	不明	不明	合成プレートガーダー橋
4	Yellow Mill Pond橋	米国	1957	1958	1970	11~15	水辺	格子合成プレートガーダー橋
5	Yellow Mill Pond橋	米国	1957	1958	1973	16~20	水辺	格子合成プレートガーダー橋
6	Yellow Mill Pond橋	米国	1957	1958	1973	16~20	水辺	格子合成プレートガーダー橋
7	King's橋	豪州	1961	不明	1962	0~5	不明	プレートガーダー橋
RBR								
課題	Yellow Mill Pond橋	米国	1957	1958	1970	20~	水辺	格子合成プレートガーダー橋

現象/損傷箇所						現象/損傷状態			
損傷位置	損傷ブロック	損傷構造	溶接種類	損傷部材		損傷方向	亀裂様式	損傷規模	補修歴
不明	主桁と対傾構の連結部	対傾構, カセットプレート	隅肉溶接	溶接上		平行	不明	小	有
端支点上	主桁の継手部	主桁上フランジ, ブラケット	隅肉溶接	溶接上		不明	不明	中	無
*支点付近	ソールプレート取付部	主桁下フランジ, ソールプレート	隅肉溶接	主桁下フランジ		平行	(i)	中	無
*支点付近	カバープレート取付部	主桁下フランジ, カバープレート	隅肉溶接	溶接上		平行	(i)	大	無
*支点付近	カバープレート取付部	主桁下フランジ, カバープレート	隅肉溶接	溶接上		平行	(i)	小	無
*支点付近	カバープレート取付部	主桁下フランジ, カバープレート	隅肉溶接	溶接上		平行	(i)	大	無
支間中間部	カバープレート取付部	主桁下フランジ, カバープレート	隅肉溶接	主桁下フランジ		平行	(i)	大	無
*支点付近	カバープレート取付部	主桁下フランジ, カバープレート	隅肉溶接	溶接上		平行	(i)		無

要因/損傷要因		
外的要因	内的要因	作用力
横分配作用, 活荷重の作用	応力集中	重ね継手の作用力②
横分配作用, 面外方向変形	応力集中	重ね継手の作用力②
剛性の変化	応力集中	重ね継手の作用力②
活荷重の作用, 溶接不良	応力集中	重ね継手の作用力②
活荷重の作用, 溶接不良	応力集中	重ね継手の作用力②
活荷重の作用, 溶接不良	応力集中	重ね継手の作用力②
溶接不良, 材質不良	応力集中	重ね継手の作用力②
活荷重の作用, 溶接不良, 材質不良	応力集中	重ね継手の作用力②
活荷重の作用, 溶接不良	応力集中	重ね継手の作用力②

対策/補修方法						対策/補強方法		確信度
補修前処理	前処理目的	補修方法	補修目的	補修後処理	後処理目的	補強方法	補強目的	
						対傾構のガス切断	応力集中の軽減	0.79
		連結板の交換	欠陥部材の交換			連結ボルトの除去	面外変形の軽減	0.67
ガウジング	亀裂部の除去	再溶接	原形復旧			高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	0.67
						高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	0.59
		ピーニング	亀裂部の除去					0.59
		再溶融	原形復旧					0.59
								0.14
グラインダ	溶接ヒートノットの除去	ピーニング, 再溶接, 主桁の交換	亀裂部の除去, 原形復旧, 欠陥部材の交換	グラインダ	表面の平滑化	高力ボルト	強度の向上	
		ピーニング	亀裂部の除去			高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	

表-7 AR プロセスから得られた実行結果

対策/補修方法						対策/補強方法		適応度
補修前処理	前処理目的	補修方法	補修目的	補修後処理	後処理目的	補強方法	補強目的	
		ピーニング	亀裂部の除去			高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	高 ↑ 低 ↓
		再溶融	原形復旧			連結ボルトの除去	強度の向上	
		連結板の交換	欠陥部材の除去			対傾構のガス切断, 連結ボルトの除去, 高力ボルトを用いた添接板	応力集中の軽減, 面外変形の軽減, 強度の向上	
		ピーニング	亀裂部の除去			対傾構のガス切断, 連結ボルトの除去	応力集中の軽減, 面外変形の軽減	
		再溶融	原形復旧			対傾構のガス切断, 連結ボルトの除去	応力集中の軽減, 面外変形の軽減	
		ピーニング	亀裂部の除去			高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	課題

参考文献

- 1) Mikami, I., Tanaka, S., Kurachi, A., Expert System with Learning Ability for Retrofitting Steel Bridges, Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.8, No.1, pp.88-102, Jan., 1994.
- 2) Tanaka, S., Mikami, I., A Diagnostic Knowledge-Based System with Analogical Inference and Machine Learning, Knowledge Support System in Civil Engineering, International Association for Bridge and Structural Engineering, pp.157-166, Mar., 1995.
- 3) 田中成典・三上市藏・前田秀典：事例ベース推論を用いた鋼道路橋疲労損傷の補修方法選定システム，第2回ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集，日本ファジィ学会，pp.37-42，1994.12.
- 4) 田中成典・三上市藏・前田秀典・小林篤司：事例ベース推論とルールベース推論を併用した鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムの開発，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，pp.575-586，1995.3.
- 5) 田中成典・三上市藏・前田秀典・小林篤司：CBRとRBRを併用した診断型知識ベースシステムにおける遺伝的アルゴリズム手法を用いた類推推論についての基礎的研究，土木情報システム論文集，土木学会，Vol.4，pp.99-104，1995.10.
- 6) 人工知能ハンドブック，人工知能学会，pp.58-60，1990.1.
- 7) Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 8) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，人工知能学会誌，Vol.7，No.1，pp.26-37，1992.1.
- 9) 杉本博之：GAの工業設計への応用に向けて，数理科学，No.353，pp.45-50，1992.11.
- 10) 山本洋敬・杉本博之・笹木敏信・満尾淳：GAによる仮設鋼矢板締切工の設計，土木学会第47回年次学術講演会概要集，pp.1204-1205，1992.9.
- 11) 杉本博之・鹿汴麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24，pp.67-76，1993.7.
- 12) 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.
- 13) 鹿汴麗・杉本博之：GAにおけるパラメータの効果に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，pp.619-626，1995.3.
- 14) 夏秋義広・向台茂・保田敬一・古田均：連続桁RC床版の打設順序決定問題への遺伝的アルゴリズムの適用，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，pp.627-633，1995.3.
- 15) 近田康夫・橘賢二・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.
- 16) 佐藤栄作：鋼道路橋の補修・補強の概要，橋梁と基礎，建設図書，Vol.28，No.8，pp.11-16，1994.8.
- 17) 田中成典・三上市藏・前田秀典：動的矛盾の検出・解消処理を施した鋼橋疲労損傷補修方法選定システム，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，pp.587-596，1995.3.
- 18) Fisher, J.W.：鋼橋の疲労と破壊－ケーススタディー，建設図書，pp.43-62，1987.

(1995年9月18日受付)