

鋼道路橋鉄筋コンクリート床版の補修工法選定エキスパートシステムのための

重みづけの方法：一対比較法と階層分析法の比較

関西大学工学部 正会員 三上市藏

朝東洋情報システム 正会員 田中成典

1. まえがき

著者らは、鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の損傷度判定と補修工法選定について、広く認められている知識を整理し、エキスパート・システム(Expert System: 以下、ES)を構築し、^{1)~4)}実橋に対する工事例を用いて、これらのESを評価した。

それらESでは、損傷項目と補修工法との関連、損傷度と補修工法との関連が知識ベースに取り入れられたが、補修工法を決定する上で重要因子である損傷要因の推定はなされていない。そこで、RC床版の損傷要因の推定に関する知識を整理し、ルールとフレームを用いて、ESを構築⁵⁾した。

以上の研究によって、ESは着実に実用化に向けて改良された。しかし、まだ発展の余地や開発すべきテクニックが種々残っている。文献1)~4)では、工法選定条件⁶⁾の重みづけをESの使用者である技術者に要求したが、初・中級技術者には重みづけが困難であることが多い。そこで、本研究では、一対比較法(Method of Paired Comparison: 以下、MPC)^{7)~13)}と階層分析法(Analytic Hierarchy Process: 以下、AHP)^{14)~15)}を適用して、工法選定条件の重みを決定する方法を試みた。

2. MPCとAHPの比較

ESを構築する上での一番の問題点は次のことであろう。第3者、特にKE(Knowledge Engineers)と呼ばれる者が、専門家から知識を引き出す場合、専門家にとって常識である知識がかえって引き出し難い。それを取り入れないままESを構築すると、誤った推論が実行される。また、確信度を取り扱う場合には、ルールの信頼性を数量化する時に問題が生じやすいし、ファジイ理論を用いる場合には、メンバーシップ関数の設定時に問題が生じやすい。

KEが、専門家に対するインタビューや相談から、専門家の蓄積されたノウハウを数量化することは現在のところ困難である。したがって、KE自身が確信度を決定するのでなく、専門家が自ら確信度を決定するのが望ましく、それを支援する技法がMPCとAHPである。

本研究では、工法選定条件の評価項目として、「(a)耐荷力増加を望む」、「(b)可能な交通規制の程度」、「(c)施工性が良い工法を望む」、「(d)経済性が良い工法を望む」、「(e)美観を重んじる」がある。これらの評価項目間の重みを決定する上で、MPCとAHPの比較を表-1に示す。

両方法は、特定の基準からみた価値の程度を定めるのは困難であるが、2つのものを見比べて比較判断を下すことは、容易であることに注目した方法である。n個の対象を比較評価しなければならない

表-1 MPCとAHPの比較

	MPC	AHP
①比較の方法	二つのものを見比べてどちらかを選ぶ	二つのものを重みをつけて見比べる
②評価者数	多数	一人
③評価者レベル	平均的レベルの専門家	ハイレベルの専門家
④経済性	時間とコストに問題有り	時間の削減可能でコストが安価
⑤特徴	多数の専門家の意見が反映される	一人の専門家の価値観が反映される
⑥統計処理法	標準正規分布を用いる	固有値と固有ベクトルを用いる
⑦適合度	Mostellerの方法で適合度を検討する	整合度と整合比から信頼度を検討する
⑧適用分野	社会心理学的アプローチ	工学的アプローチ
⑨実用性	専門委員会のある重要橋梁に向く	小規模な橋梁に向く

いときは、 n 個の対象の任意の2個について、広義の比較吟味を評価者に行わせる。可能な比較対の数は、 $C_2 = n(n-1)/2$ であるから、 n が少し大きくなるとかなりの数になり、実施に多大な時間を要するので、通常、3～12個の対象を用いる。

比較判断結果から尺度値（重み）を算出する方法に、次のような種類がある。

(1) 数十人に一回ずつ評価項目の比較対を一对比較させ、重みを算出する。^{7) - 13)}

(2) 一人に数十回、評価項目の比較対を一对比較させ、重みを算出する。^{7) - 13)}

(3) 一人に一回、評価項目の比較対の重要度を一对比較させ、重みを算出する。^{14) 15)}

(1)と(2)は、MPCであり、尺度値算出のための統計処理法は(1)、(2)とも同じであるが、(2)ではランダムな順序で回答を求める必要がある。(3)はAHPであり、ESの曖昧性を扱う方法として、土木工学分野へ適用している報告^{16) 17)}が見られる。

3. MPCの適用

一对比較法は、多数の評価者に二つのものを見比べてどちらかを選ばせる方法である。比較判断の計算は、次の仮定を用いたThurstoneの最も簡単な方法^{7) - 13)}で行う。

①多数の評価者について得られた結果に、比較判断の法則をそのまま適用する。

②比較判断が正規分布する。

工法選定条件の評価項目は $n = 5$ 種類有るので、考えられる比較対は、 $C_2 = 5(5-1)/2 = 10$ 組存在する。それらについて、1人1回のアンケート調査を行う。今、評価者24名の場合に、表-2の集計が得られたとしよう。ここに、第1行第2列の度数11は、「(a)耐荷力増加を望む」よりも「(b)可能な交通規制の程度」を「より重要」と判断した評価者が11名存在したことを示している。主対角に関して対称な位置にある、第2行第1列の度数13は、「(b)可能な交通規制の程度」よりも「(a)耐荷力増加を望む」を「より重要」と判断した評価者が13名存在したことを示す。対称な位置の度数の和は、評価者数に等しくなる。

表-2の度数を評価者数で割って無次元化を図ると、比率が表-3のように求まる。主対角上の比較対は、同一評価項目を比較したことになり、「より重要」と「非重要」が半々になると考え、比率

表-2 一对比較判断による度数 (対象: 24名)

より重要 非重要	(a) 耐荷力増加を望む	(b) 可能な交通規制の程度	(c) 施工性が良い工法を望む	(d) 経済性が良い工法を望む	(e) 美観を重んじる
(a) 耐荷力増加を望む		11	9	5	8
(b) 可能な交通規制の程度	13		10	5	8
(c) 施工性が良い工法を望む	15	14		8	10
(d) 経済性が良い工法を望む	19	19	16		14
(e) 美観を重んじる	16	16	11	10	

表-3 度数から得られる比率

より重要 非重要	(a) 耐荷力増加を望む	(b) 可能な交通規制の程度	(c) 施工性が良い工法を望む	(d) 経済性が良い工法を望む	(e) 美観を重んじる
(a) 耐荷力増加を望む	0.500	0.458	0.375	0.208	0.333
(b) 可能な交通規制の程度	0.542	0.500	0.417	0.208	0.333
(c) 施工性が良い工法を望む	0.625	0.583	0.500	0.333	0.542
(d) 経済性が良い工法を望む	0.792	0.792	0.667	0.500	0.583
(e) 美観を重んじる	0.667	0.667	0.458	0.417	0.500

は 0.500 とする。

ここで、平均値が 0、標準偏差が 1 であるような標準正規分布 $N(0, 1)^{18)}$ を考える。パーセント点 (Percentage Points) を a 、下側確率 (Lower Probabilities) を P とすると次式が成り立つ。

$$P = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (1)$$

表-3 の比率 P に対するパーセント点 a の値を式〔1〕から求めると、¹⁹⁾ 表-4 のようになる。ただし、パーセント点はライブラリ²⁰⁾を使って、次式から計算した。

$$1 - P = \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (2)$$

表-4 の各列の和を求めると、(A) 合計のようになる。これを工法選定条件の評価項目数 5 で割り、平均を求めると、(B) 平均のようになる。ここで、各列の平均値から負の値を除くために、最小値を 0 にする。表-4 の場合、「(d) 経済性が良い工法を望む」の列の平均 -0.453 が最小値なので、この値の絶対値を各列の平均値に加えると、(C) のようになる。これが、工法選定条件の重みで、最小値が 0 の値として算出される。

Thurstone の仮定⁷⁾⁻¹³⁾ が事実と反するかどうかは、Mosteller の方法で適合度を検討⁷⁾⁻¹³⁾ すれば分かる。しかし、本研究では、一対比較法から算出される重みにそれほど厳密さを求めている。また、誤差は確信度 (Certainty Factor) に多少影響を与えても、工法選定結果の序列にはそれほど影響しないであろうから、ここでは適合度の検討は行わない。

4. AHP の適用

AHP は、一対比較法と異なって、二つのものを見比べてどちらがどれくらい重要であるかを答えさせる方法である。それゆえ、AHP は、評価者の価値観がそのまま反映されることになる。そのため、信頼度の検証を行う必要がある。

AHP は、評価項目の重要度の比を問題にしている。このような方式を一般に比率尺度 (Ratio Scale) による評価と呼ぶ。AHP は比率尺度による一対比較を基に、全体としての評価項目間の比率尺度を決定する方法である。

比較対は、 $n=10$ 組存在するので、それらについて 1 人に 1 回、評価項目の比較対の重要度を一対比較させる。全評価項目間の一対比較値が表-5 のように得られたとしよう。ここに、第 1 行第 2 列の比較値 1/2 は、「(a) 耐荷力増加を望む」よりも「(b) 可能な交通規制の程度」を 1/2 倍「より重要」と判断したことを示し

表-4 標準正規分布のパーセント点と評価項目の重み

	(a) 耐荷力増加を望む	(b) 可能な交通規制の程度	(c) 施工性が良い工法を望む	(d) 経済性が良い工法を望む	(e) 美観を重んじる
より重要 非重要					
(a) 耐荷力増加を望む	0.000	-0.105	-0.319	-0.812	-0.431
(b) 可能な交通規制の程度	0.105	0.000	-0.210	-0.812	-0.431
(c) 施工性が良い工法を望む	0.319	0.210	0.000	-0.431	0.105
(d) 経済性が良い工法を望む	0.812	0.812	0.431	0.000	0.210
(e) 美観を重んじる	0.431	0.431	-0.105	-0.210	0.000
(A) 合計	1.666	1.349	-0.203	-2.266	-0.546
(B) 平均	0.333	0.270	-0.041	-0.453	-0.109
(C) 平均 +0.453	0.786	0.723	0.412	0.000	0.344

ている。主対角に関して対称な位置にある、第2行第1列の比較値2は、「(b)可能な交通規制の程度」よりも「(a)耐荷力増加を望む」を2倍「より重要」と判断したことを示す。対称な位置の比較値は、積が「1」に等しくなる。ここで、比較値は表-6に示す数値を参考にする。また、必ずどちらか一方を「1」の基準で考える。

表-5の一对比較値を一对比較行列Aとし表-7の上段に定める。主対角上の比較対は、同一評価項目を比較したことになり、「より重要」と「非重要」が半々になると考え、比較値は1とする。

次に、表-7の各列の幾何平均を取り、その横計「7.319544」で(A)幾何平均を割ると、(B)重みようになる。これを初期ベクトルとして、べき乗法(Power Method)²¹⁾を用いて、固有値と固有ベクトルの関係式(3)を満たす最大固有値 $\lambda_{\max}$ と最大固有ベクトル v に収束するまで反復計算を繰り返す。

$$A \cdot v = \lambda_{\max} \cdot v \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_{\max}$ と v の収束判定は相対誤差1/1000に対して行った。

その結果、最大固有ベクトルを、(C)最終重みとする。これが、工法選定条件の重みで、その横計は「1」になる。

この結果が事実と反するかどうかは、次式で定義される整合度(Consistency Index: 以下、C.I.)と整合比(Consistency Ratio: 以下、C.R.)から、信頼度を検討すれば分かる。^{14) 15)}

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{M} \quad (5)$$

ただし、Mはランダムな一对比較行列Aから、C.I.を多数回計算し、その平均値として求められたものであ

表-5 評価項目間の一对比較値

	(a) 耐荷力増加を望む	(b) 可能な交通規制の程度	(c) 施工性が良い工法を望む	(d) 経済性が良い工法を望む	(e) 美観を重んじる
より重要					
非重要					
(a) 耐荷力増加を望む		1/2	1/5	1/9	1/6
(b) 可能な交通規制の程度	2		1/3	1/7	1/4
(c) 施工性が良い工法を望む	5	3		1/3	1/2
(d) 経済性が良い工法を望む	9	7	3		3
(e) 美観を重んじる	6	4	2	1/3	

表-6 一对比較値

一对比較値	意味
1	両方の項目が同じくらい重要
3	一方が「1」、他方が若干重要
5	一方が「1」、他方が重要
7	一方が「1」、他方がかなり重要
9	一方が「1」、他方が絶対的に重要
2, 4, 6, 8	補助的に用いる

表-7 一对比較行列と重みの算出

	(a) 耐荷力増加を望む	(b) 可能な交通規制の程度	(c) 施工性が良い工法を望む	(d) 経済性が良い工法を望む	(e) 美観を重んじる
より重要					
非重要					
(a) 耐荷力増加を望む	1	1/2	1/5	1/9	1/6
(b) 可能な交通規制の程度	2	1	1/3	1/7	1/4
(c) 施工性が良い工法を望む	5	3	1	1/3	1/2
(d) 経済性が良い工法を望む	9	7	3	1	3
(e) 美観を重んじる	6	4	2	1/3	1
(A) 幾何平均	3.519482	2.111786	0.832553	0.281374	0.574349
(B) 重み ((A)/(A)の横計)	0.480834	0.288513	0.113744	0.038441	0.078468
(C) 最終重み	0.481145	0.286430	0.114110	0.038827	0.079489
(D) 備考	$\lambda_{\max} = 5.08383$, $C.I. = 0.023457$, $C.R. = 0.020944$				

る。この値をランダム整合度と呼ぶ。今、 $n = 5$ の時のランダム整合度 M は、 $1.12^{(4)(15)}$ である。

これらの信頼度の式〔4〕、〔5〕が0.1未満の値を取るとき、(C)最終重みを採用するのに値すると評価する。今、(D)備考で、C.I.とC.R.がともに0.1未満なので、(C)は信頼性があると考えられる。

5. システムの構築

5.1 MPC 本システムは、佛東洋情報システムのエキスパート・シェルBRAINS (日本語版)^{22) 23)}を用いて構築した。評価項目の一对比較はBRAINSで記述したが、データセットの初期化、実行回数のカウント、回答のカウント、重みの算出にFORTRAN 77を用いた。ただし、FORTRAN 77プログラムは、実行形式にしておく必要がある。

一对比較法を適用する場合、一番最初に回答する評価者は、推論を実行するのに必要な合計11個の順データセットの初期化を行う。評価者の人数を暗黙のうちにカウントする。次に、一对比較の問い掛けが端末に表示される。評価者は一人で、問われる比較対の「より重要」と思われるものを答える。そのとき、度数のみについて、カウント情報を順データセットに蓄える。各評価者の回答が終了すると、推論は終了する。

この操作を全評価者に対して繰り返す。全入力終了すると、合計11個のデータセットに蓄えられている度数を集計し、重みの算出に進む。そして、結果が確信度として表示される。

5.2 AHP 本システムでは、評価項目の重要度を一对比較させるには、BRAINSでの記述が不可能であるため、この外部処理はUTILisp²⁴⁾で記述した。重みと信頼度は、FORTRAN 77を用いて算出した。ただし、FORTRAN 77プログラムは、実行形式にしておく必要がある。また、UTILisp から、データセットに実数を入力すると、FORTRAN 77では識別不可能な UTILispの内部表現で表されるため、読み込みができない。そこで、二三の技法を駆使した。

本システムを適用する場合、BRAINSを起動させるコマンドプロシジャで、推論実行に必要な2個の順データセットの作成を行う。

本システムを実行すると、入力方法の提示を約10～15秒間行い、その後、一对比較の問い掛けが端末に表示される。評価者は、問われる比較対で、一方を基準「1」とし、他方に重要度「1」～「9」の比較値を用いて、表-6の基準に沿って答えていく。そこで、入力方法は、Lisp言語特有のリスト構造として数値を入力する。次のような入力ミスがあると、再度その評価項目を表示するようにした。

- ①リストの形で入力されていない場合
- ②入力数が足りない場合
- ③「1」～「9」の数値で与えていない場合

全評価項目の回答が終了すると、その結果を作成したデータセットに蓄える。そして、データセットに蓄えられた結果を基に、重みの算出と信頼度の評価に進み、結果が確信度として表示される。また、別のデータセットにも、その計算結果を出力する。

6. 推論実行例

AHPの推論実行例を図-1に示す。事象-1の「AHPを適用しますか？」の問いに対して「Y」を入力すると、次に入力方法の提示が表示される。その後、全評価項目の一对比較をLisp言語特有のリストの形で数値を入力し、全評価項目間の一对比較を行う。それらの一对比較値が、データセットに蓄えられ、その結果を基に暗黙のうちに、重みと信頼度の算出に進む。

以上で、推論結果が表示される。ここでは、工法選定条件の評価項目「(a)耐荷力増加を望む」、「(b)可能な交通規制の程度」、「(c)施工性が良い工法を望む」の確信度がそれぞれ(0.48, 0.29, 0.11)と推論された。「(d)経済性が良い工法を望む」、「(e)美観を重んじる」については、確信度が0.10未満のため表示され

1 AHPを適用しますか?

YかNで答えてください。 --> Y

Analytic Hierarchy Process

** 評価項目の重要度を一対比較させる **

例

(a) 耐荷力増加を望む

(b) 可能な交通規制の程度

上記の比較対で、一方を「1」の基準とし、
他方に重要度「1」～「9」の比較値を用いる。

入力例) (a) & (b) => (1 3)

説明

(a) より (b) の方が、「3」ぐらい重要

Analytic Hierarchy Process

** 評価項目の重要度を一対比較させる **

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(a) 耐荷力増加を望む

(b) 可能な交通規制の程度

(a) & (b) => (2 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(a) 耐荷力増加を望む

(c) 施工性が良い工法を望む

(a) & (c) => (5 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(a) 耐荷力増加を望む

(d) 経済性が良い工法を望む

(a) & (d) => (9 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(a) 耐荷力増加を望む

(e) 美観を重んじる

(a) & (e) => (6 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(b) 可能な交通規制の程度

(c) 施工性が良い工法を望む

(b) & (c) => (3 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(b) 可能な交通規制の程度

(d) 経済性が良い工法を望む

(b) & (d) => (7 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(b) 可能な交通規制の程度

(e) 美観を重んじる

(b) & (e) => (4 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(c) 施工性が良い工法を望む

(d) 経済性が良い工法を望む

(c) & (d) => (3 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(c) 施工性が良い工法を望む

(e) 美観を重んじる

(c) & (e) => (2 1)

** 次の評価項目を一対比較して下さい **

(d) 経済性が良い工法を望む

(e) 美観を重んじる

(d) & (e) => (1 3)

** 推論結果は次のとおりです。

0.48 耐荷力増加を望む(KOUZ)

0.29 可能な交通規制の程度(KOUT)

0.11 施工性が良い工法を望む(SEKO)

** 従って、次の措置をとるべきです。

1 上記の確信度を個々の重みとする。(FINISH)

図-1 推論実行例

ていない(BRAINSは0.00~0.10間の確信度を表示しない)。そこで、詳細な結果を知るために、データセットの出力結果を覗くと、図-2のように、「(d)経済性が良い工法を望む」、「(e)美観を重んじる」は、それぞれ{0.038827, 0.079489}の結果を得ていることが分かる。また、C.I., C.R.も{0.023457, 0.020944}の結果を得て、信頼性があることが分かる。これらの確信度は、工法選定条件の評価項目の重みとして取り扱われる。また、C.I., C.R.のどちらか一方が、0.10以上のときは図-3のように、再度実行することを示唆するメッセージが表示される。

7. あとがき

鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の補修工法選定に関して、工法選定条件の評価項目を対象に、MPCとAHPを用いて重みを決定する二つのシステムを構築した。両システムは、評価者が、端末に表示される問いに即答していくシステムである。MPCは、多数の専門家の意見が反映され、専門委員会のある重要橋梁に向くと考えられる。AHPは、一人の専門家の価値観がそのまま反映されるため、小規模な橋梁に向くと考えられる。また、MPCのシステムは、全アンケート結果が標準正規分布をなすという仮定から、算出される重みに対して、適合度を検討していない。しかし、AHPのシステムでは、一人の価値観が反映されるため、信頼性の

検証を行った。両システムは、時と場合によって、容易に専門家の知識を導き、数量として知識の優先順位を決定することが可能であることが分かる。

今回のシステムでは、工法選定条件の重みづけにMPCとAHPを適用したが、工法選定条件に対する補修工法の確信度の表にMPCとAHPを適用することも考えられる。例えば、文献3)の「表-10 各選定条件に対する各工法確信度」では、システムが妥当な推論結果を与えるように、確信度を-0.5~0.5の範囲で設定したが、選定条件の項目に対する補修工法の優劣はそれほど厳密に定められているのではない。このような確信度表に対してもMPCとAHPを適用して、知識の数量化をより厳密にしてみたい。

確信度は全項目の間の曖昧性をバランスよく設定したものでなければならない。そうでないと、推論結果を導く確信度の計算過程で、とんでもない結果を産みかねない。不合理な推論結果が得られても、すべてが曖昧な量であるから、どこに誤りがあるのか判断できない。また、確信度は技術の進歩など種々の要因で変化するものであり、絶えず設定しなおさなければならないものである。以上のことを考えると、ESの核となる確信度の表を決定するに当たって、MPCとAHPは、専門家の知識を容易に素早く引き出すことのできる技法である。

近年、ESのための知識を引き出すことに研究の重点が移りつつある。今まで、KEがESを構築してきたが、知識の受け渡しが満足になされていないことが多い。そこで、今回構築した両システムは、十分に威力を発揮するものとする。

両システムは、関西大学情報処理センターの汎用コンピュータ FACOM M-380を用いて構築した。最後に、関西大学社会学部の東村高良助教授には一対比較法の文献を教示頂いた。ここに、感謝の意を表する。

日本語EDIT --- X86M719.TEST80.DATA -----				表示欄 001 072
コマンド ==>				移動量 ==> 20
***** データの先頭 *****				V10L30*****
000001	0.481145	...	(a)	耐荷力増加を望む
000002	0.286430	...	(b)	可能な交通規制の程度
000003	0.114110	...	(c)	施工性が良い工法を望む
000004	0.038827	...	(d)	経済性が良い工法を望む
000005	0.079489	...	(e)	美観を重んじる
000006	0.023457	...	C.I.	整合度
000007	0.020944	...	C.R.	整合比
***** データの末尾 *****				

図-2 データセットに出力された重みと信頼度の算出結果

** 推論結果は次のとおりです。
 1 以下の推論結果に誤りがある。
 ***** (MISTAKE)
 0.42 耐荷力増加を望む(KOUZ)
 0.38 可能な交通規制の程度(KOUT)

 ** 従って、次の措置をとるべきです。
 1 再度実行して下さい。(FINISH-NOT)
 0.11 整合度 (C. I.)が0.1 以上(CI)
 0.10 整合比 (C. R.)が0.1 以上(CR)

図-3 信頼できない推論結果

参考文献

- 1) 三上市藏・江澤義典・森澤敬文・田中成典・朝倉隆文：RC床版の点検・補修に関するエキスパート・システム，電算機利用に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.159-166，1986.10.
- 2) 三上市藏・江澤義典・田中成典・朝倉隆文：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷度判定と補修工法選定のための知識ベースエキスパートシステム，構造工学論文集，土木学会，Vol.33A，pp.317-326，1987.3.
- 3) 三上市藏・田中成典・安藤黄太・小森宏昭：道路橋RC床版の経年を考慮した補修工法選定のためのエキスパート・システム，電算機利用に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.185-192，1987.10.
- 4) 三上市藏・田中成典・小森宏昭・安藤黄太：日本道路公団の損傷度判定法に基づく道路橋RC床版の補修工法選定のためのエキスパート・システム，電算機利用に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.73-76，1987.10.
- 5) 三上市藏・松井繁之・田中成典・新内康芳：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷要因推定のためのルールとフレームによる知識ベース・エキスパートシステム，構造工学論文集，土木学会，Vol.34A，1988.3.
- 6) 土木学会関西支部：既存橋梁の耐荷力と耐久性，1985.7.
- 7) 心理学実験指導研究会編：実験とテスト—心理学の基礎—四訂版，1968.
- 8) 池田央：行動科学の方法，東京大学出版会，1982.
- 9) 田中良久：心理学研究法，第16巻，尺度構成，東京大学出版会，1983.
- 10) 東洋・水野欽司・芝祐順・中谷和夫：心理学研究法，第14巻，データ解析Ⅰ，東京大学出版会，1981.
- 11) 心理学実験指導研究会編：実験とテスト—心理学の基礎—解説編，1979.
- 12) 心理学実験指導研究会編：実験とテスト—心理学の基礎—実習編，1980.
- 13) 心理学実験指導研究会編：実験とテスト—心理学の基礎—実習編，培風館.
- 14) 刀根薫：ゲーム感覚意思決定法，日科技連，1986.
- 15) Saaty., T. L. : A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, Journal of Mathematical Psychology, Vol.15, No.3, pp.234-281, 1977.6.
- 16) 中村秀治・松浦真一・寺野隆雄・篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測エキスパート・システムとその適用，土木学会論文集，土木学会，No.374/I-6，pp.513-521，1986.10.
- 17) 古川浩平・古田均・仁多和英：一対比較法の最適耐震設計への応用に関する研究，土木学会論文集，土木学会，No.368/I-5，pp.393-400，1986.4.
- 18) Alfredo., H-S. A., and Wilson., H. T. : Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons, Inc., 1975. 伊藤學，亀田弘行（訳）：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1980.
- 19) 渡部力・名取亮・小国力：数値解析とFORTRAN，丸善，1983.
- 20) 関西大学情報処理センター：センターライブラリKSSL.
- 21) 戸川隼人：マトリックスの数値計算，オーム社，1971.
- 22) 御東洋情報システム：推論システム BRAINS 利用者マニュアル.
- 23) 御東洋情報システム：推論システム BRAINS システム解説書.
- 24) 富士通機：FACOM UTILISP 手引書，1985.3.