

代替案評価のための階層構造図作成支援システムに関する基礎的研究

金沢大学工学部 正員 木俣 昇
星稜女子短期大学 正員 ○竹村 哲

1. まえがき

現代社会は、そのシステムとしての特性をますます強めてきている。その結果、どの計画にも、複雑なインパクトが随伴する。また、現代社会は、参加指向型の社会に向かっており、社会的計画への参加要求も強い。このような状況を背景に、多くの計画課題は、問題状況の認識から出発し、多方面からの総合的評価を必須とする状況にある。

問題状況の認識段階を支援する方法論としては、KJ法、ISM法、SSA法、RD法などの種々の構造化手法がある。また、構造図を総合的評価に結びつけたものとしては、T.L. SaatyのAHP法や、著者らによる代替案の総合的順位付システム^{2) 3)}などが提案されてきている。

AHP法は、問題状況の認識から出発し、まず、評価の階層構造図を作成し、その階層毎に規定要因の相対的評価を行い、その重みを評価値行列の固有値を用いて算定する。そして、それらを評価の階層構造に沿って演算することによって総合化するシステムといえよう。著者らは、道路の除雪順位や橋梁の維持・管理順位などを対象に、代替案の総合的順位付システムを開発してきたが、これも基本的には、問題状況の構造化から出発して、相対的評価を経て、総合評価に到るという同形のプロセスを持つシステムである。このような研究の流れは、Checklandの分類に従えば、評価主体を明示した“学習”をパラダイムとするソフト・システムズ・アプローチ⁴⁾の系列に属す。

さて、上述の2つのシステムでは、構造図の中で

も推移律が成立する階層構造図が使用されている。それは、絶対評価は一般的には相対評価より困難であるため、相対評価の採用が望ましいが、それには逆に総合評価としての整合性の保証が必要となることによる。即ち、推移律の成立は、この総合評価としての整合性を構造的に保証する一つの根拠となっている。

上述したように構造化手法には種々のものがあるが、ISM法は、この推移律の成立を前提とする手法である。推移律が成立する関係しか取り扱えないという意味では、問題状況の認識段階の支援に限定すれば、他の手法より不自由なシステムであるだろう。しかし、総合評価のシステム化にとっては、上述のような意味で整合性を保証する重要な支援システムである。上述の著者らの順位付けシステムでは、規定要因の階層構造化を担当する第1のサブ・プロセスは、このISM法による支援を前提にしている。

AHP法の階層構造図の作成にも、ISM法が使用できる。また、ISM法をそのような形で使用しようという発想は、当然のように思われる。しかし、AHP法の適用研究を調べて見ると、ISM法の使用は全くといってよいほどないことに気付く。それにはいろいろな理由があるのだろうが、ISM法の使い勝手に問題があるのもその一因である。著者らのシステムでも、実際には、後続の第2、第3のサブ・プロセスの支援システムの成果に比べ、第1のサブ・プロセスでの展開力には不十分さを感じている。それも、やはり現使用のISM法の使い勝手にまだまだ問題があることによる。

これには、二つの側面がある。一つは、問題状況

の認識過程の支援システムとしての機能的要件であるフィードバックの迅速性と容易性の問題と、作成された階層構造図の情報形態としての見易さの問題である。もう一つは、利用者側からのアクセス要件であるハードとソフトの入手性の問題である。F.E. Langhorst によって開発されたシステム⁴⁾は、階層構造図の見易さにも十分に配慮した優れたシステムであるが、第二の要件充足性に問題があり、誰にでも容易に利用できるというものではない。当然とも思われるAHP法でISM法が全く使用されていないということは、このような事情を逆に反映しているともいえる。

作成された階層構造図の情報形態としての見易さを阻害する大きな要因は、要素間の関係を表示する辺の交差の煩雑さにある。F.E. Langhorst らのシステムでは、この辺の交差の最小化を目指すのが、使い勝手という点では、実用的に十分な見易さのレベルまで軽減されれば良い。本論文では、このような認識の下で、パーソナル・コンピュータでも十分に使用でき、ソフトも各自が自前で組めて、かつ上述の要件を満たす使い勝手の良いシステム化について報告する。

まず、ISM法による問題状況の構造化の基本プロセスを示し、階層構造図における要素間の関係を表示する辺の煩雑な交差が、その見易さを阻害する大きな要因となる状況を説明する。そして、この辺の交差を改善する2レベル間のアルゴリズムとして、WarfieldらのGenerating Matrix 法⁵⁾と、杉山らのBarycentric 法⁶⁾を取り上げ、その長所、問題点を整理する。その上でフィードバック性を十分に考慮した支援システムとして、要素の追加・削除や、関係の修正作業を階層構造図を見ながら行える工夫として、マルチ・ウィンドウ方式を採用した実用システム構成を行う。そして、その実用的効用を実証するために、橋梁の維持・管理順位評価のための規定要因の選定のための構造化支援と、既発表のAHP法の適用事例における階層構造図の再構成を目的とする支援事例研究を行い、現場での使い勝手からみたシステムの評価と問題点の整理を行う。

2. 階層構造図における辺の交差数の改善

(1) ISM法による階層構造図作成プロセス

ISM法による問題の階層構造化は、図-1に示すようなステップによってなされる。即ち、問題状況より出発して、関係すると思われる「要素」をまず抽出する。次に、これらの「要素」を一对比較し、「関係」の有無を識別する。「関係」が有りとなれば「1」、無であれば「0」を入力する。この「関係」の識別に際しては、それが直接的か間接的であるかを意識する必要はない。

このようにして作成された「2値関係データ行列」には、従って直接的関係も間接的關係も含まれる。ISM法の特徴は、これらの「関係」には推移律が成立することを前提にして、「要素」を階層レベルに分割し、直接的関係のみを表示する「骨格行列」を抽出するアルゴリズムにある。「階層構造図」は、この行列を用いて容易に作成される。

主体は、この直接的な「関係」のみを提示した「階層構造図」によって、自己の問題認識を客観的に検討することができる。もし、そこに疑問点を発見すれば、「関係」の識別ないしは「要素」の抽出

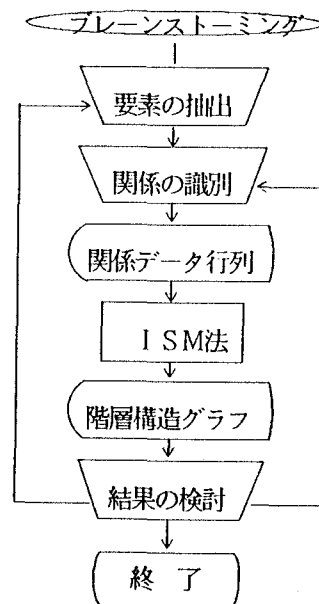


図1 ISM法による階層構造化の基本プロセス

のステップまで戻り、再検討するというフィードバック過程を繰り返すことによって、よりよい問題状況の構造化の達成が期待される。

(2) 辺の交差による認識阻害

構造化手法は、基本的には全て図-1と同じプロセスより成っている。ISM法の特徴は、「関係」の識別に際しての直・間の識別の不要性と、推移律の前提の下での「階層構造図」のアルゴリズム的構成力にある。後者は、コンピュータによる迅速なフィードバック化をも可能にし、前者とあいまって、問題認識に際しての主体の負担をさらに軽減するように働く。ISM法の使い勝手は、これらの特徴を十分に生かした簡便なシステム化によって実現される。

それには、検討すべき課題がいくつかある。第1ステップの「要素」の抽出方法とその表現方法や、第2ステップの「関係」の識別方法も、そのような課題の一つである。これらは運用上の課題である。ここでは、第3ステップの「階層構造図」の検討に際しての辺の交差の問題について説明する。これは、コンピュータ化との関連でアルゴリズム的な解決を必要とする課題である。

これは、「要素」の抽出方法の問題とも関連している。図-1のプロセスで、「要素」の抽出が、枠組みを設定し、トップ・ダウン的になされるとする。このとき、抽出された「要素」に番号を付ければ、それらは意味カテゴリー的に並ぶ。そして、ISM法を適用して得られる「階層構造図」では、「要素」の配置は、「要素」と「要素」を結ぶ辺の交差が比較的少ない形となっているだろう。否、「階層構造図」の作成にISM法を使用する必要性もない。なぜならば、枠組みに従ってトップ・ダウン的に「要素」を配置していけば、「階層構造図」が求まるからである。

しかし、問題状況の認識支援を目的とする構造化手法では、枠組みを設定し、トップ・ダウン的に「要素」を抽出することには問題がある。それは、枠組み設定は、問題状況の認識に際しての先入観として働き、認識を阻害する因子となるからである。そこで、一般的には、構造化手法では、評価・批判

の一時的保留による自由な発言の保証をルールとするブレーン・ストーミングが、「要素」の抽出に際して使用される。この場合、抽出された「要素」に番号を付けるとすれば、意味カテゴリー的にも、階層構造的にもランダムに並ぶことになる。ISM法の基本アルゴリズムで作成された「階層構造図」では、その分辺の交差は多くなる。この辺の交差が多くなり、煩雑になってくれば、それが「階層構造図」による問題状況の認識を妨げることになる。

(3) 2レベル間の辺の交差数の改善アルゴリズム
階層構造図で、2レベル以上離れた要素間をつなぐ辺がないとき、その図は正規グラフであるといわれる。このようなグラフへの変換は、適当な位置にダミー要素を導入することによって達成される。それについては、Warfieldが「正規化アルゴリズム」として既に発表している。

正規グラフでは、辺の交差は、1と1+1という隣接する2つのレベル間でのみ問題となる。この2つのレベルにある要素間の関係は、骨格行列の部分行列である隣接従属行列Nによって与えられる。即ち、レベル1と1+1にある要素群を

$$L_1 = \{s^h_1, s^h_2, \dots, s^h_n\}$$

$$L_{1+1} = \{s^v_1, s^v_2, \dots, s^v_m\}$$

とすれば、これらの要素間の関係は、

$$N = \begin{matrix} & \begin{matrix} s^h_1 & s^h_2 & & s^h_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} s^v_1 \\ s^v_2 \\ \vdots \\ s^v_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \cdots & n_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、

- i) $n_{ik} = 1$ ならば関係有、要素間を結ぶ辺有。
 - ii) $n_{ik} = 0$ ならば関係無、要素間を結ぶ辺無。
- である。

レベル1+1にある2つの要素 s^v_i と s^v_j に対応する式(1)の行列の行ベクトルを $r(i)$ 、 $r(j)$ とおく：

$$r(i) = (n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{in})$$

$$r(j) = (n_{j1}, n_{j2}, \dots, n_{jn})$$

この2つの要素から出る辺と辺との間での交差数 $K(i, j)$ は、これらのベクトルの要素を用いれば、

$$K(i, j) = \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{p=q+1}^n n_{jp} n_{iq} \quad (2)$$

と書ける。従って、このレベル間での辺の総交差数 $K(N)$ は、

$$K(N) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m K(i, j) \quad (3)$$

となる。

これらの値は、隣接従属行列の要素の並びを変更することによって変わる。即ち、辺の交差数を最小化する問題は、原理的には数理計画法によって解ける。しかし、階層数が増えるにしたがって、計算時間が急速に増大し、実用性を失う。辺の交差数の改善アルゴリズムは、要素の並びを効果的に変更するルールの発見として試みられてきた。

Warfield らの方法は、隣接従属行列の行ベクトル、列ベクトルを2進数として、それを10進数に変換した値をコードとして使用する要素並び変更法である。この方法では、交差数を最小にする要素の並びを示す行列、Generating Matrix が使用される。図2に、要素数が4個のときのGenerating Matrix を示す。

コード	8	12	10	14	4	13	9	15	6	2	11	5	7	3	1
$E_4 =$	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
15	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0

図2 Generating Matrix E_4

ISM法の基本アルゴリズムで隣接従属行列が求められたとき、その各行ベクトルを2進数として、まず、それらを10進数に変換した値を求め、図2の行列の行に対応した数値、コードの並びにしたがって隣接従属行列の行の並びを変更する。次に、列ベクトルについても同様の作業を行う。この操作で行列ともにGenerating Matrix の並びに一致したときに、2レベル間での辺の交差を最小にする要素並びが得られる。ただし、図2の行列の要素が2となっているコード間では並びが入れ換っていてもよいことが知られている。

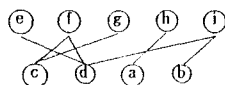
このような行列は、現在のところは、各レベルにある要素数が5個以内の場合にしか見つかっていない。杉山らは、これに変わるものとして、各行ベクトルに対して、次式のような重心を求め、それをコードとして要素の並びを変更し、辺の交差数を改善する方法、Barycentric 法を提案している：

$$B(r(i)) = \frac{\sum_{k=1}^m k n_{ik}}{\sum_{k=1}^m n_{ik}} \quad (4)$$

この方法のルールは非常に簡単で、式(4)を計算し、単にその大きさの順に要素を並べ替えるだけである。ただし、辺の交差数を最小にする並びが常に得られるという保証はない。例えば、図3の(1)のような隣接従属行列を考える。これにこの方法を用すれば、右欄のような重心が求まる。これに従っ

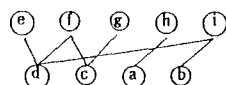
	e	f	g	h	i	$B(r(i))$
a	0	0	0	1	0	4
b	0	0	0	0	1	5
c	0	1	1	0	0	2.5
d	1	1	0	0	1	2.67

(1) 隣接従属行列N



$K(N)=4$

(2) Barycentric 法の結果



$K(N)=3$

(3) 変更例

図3 事例

てレベル $l+1$ の要素の並びを変更すれば、図 3 の (2) のグラフとなり、総交差数は 4 となる。しかし、要素 c と d を入れ換えれば、図 3 の (3) となり、交差数を 3 にすることができる。

しかし、多くの場合には、この方法でかなりの度合いで辺の交差数を減らすことができる。また、簡単なアルゴリズムであるため、誰にでも自前でソフトに組み入れることができるし、計算時間も全く問題にならない。その上に要素数の制約もないという意味では、実用的なアルゴリズムとして十分に魅力があるといえよう。

3. 階層構造図作成支援システムの構成

ISM 法による階層構造図作成の基本フローは、既に述べたように、図 1 のようになっている。支援システムは、このフローをより効果的にするものである。われわれのシステムでは、図 4 に示すような形態で構成されている。

まず、要素の登録は、KJ カード・イメージでの出力を予定したものとしている。これについては後述する。次に、関係の識別・入力との関連で、「関係詞」の設定ステップを設けた。要素の一对比較は、この「関係詞」の下での図 4 のような文章画面に対してなされる。

階層構造図の作成部は、ISM 法の基本アルゴリズム、ダミー要素の導入による正規化アルゴリズム、交差数の改善アルゴリズム、及び表示ウィンドー構成アルゴリズムによって構成されている。図 5 は 2. の (3) で紹介した Barycentric 法を利用した交差数の改善アルゴリズムの具体的構成例である。その良否は事例によって検討したい。

ウィンドウ機能の利用は、フィードバック機能の強化に関連するものである。1. で述べたように、支援システムとしての機能的要件の一つとして、フィードバックの容易性、迅速性が要求される。具体的には、このプロセスでは、要素の追加や削除を行ったり、あるいは要素間の関係の認識を修正する作業が、作成された階層構造図を見ながらできることが望まれる。そのために、われわれのシステムでは、ウィンドー機能を活用して、図 6 に示すような階層

構造図の表示用と、フィードバック作業用領域を設定し、メニューの選択で、階層構造図を見ながら、フィードバック作業用領域で、①要素の追加・削除作業、②要素間の関係の修正作業が可能となるようにした。

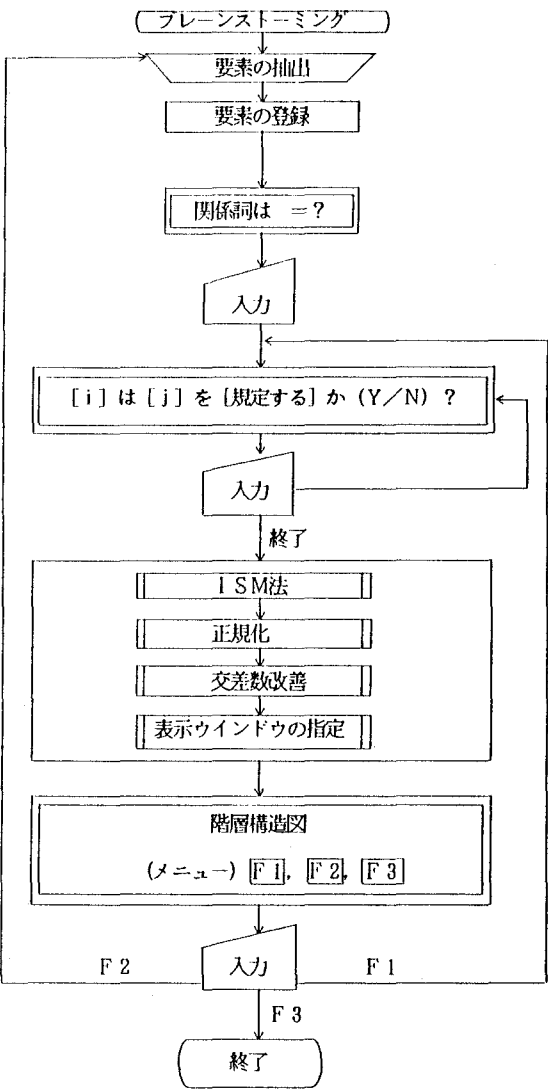


図 4 階層構造図作成支援システムの構成図

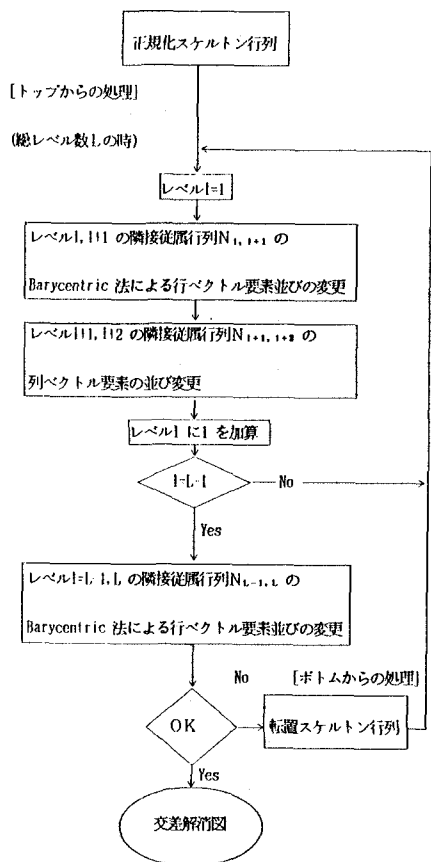


図5 交差数改善アルゴリズム

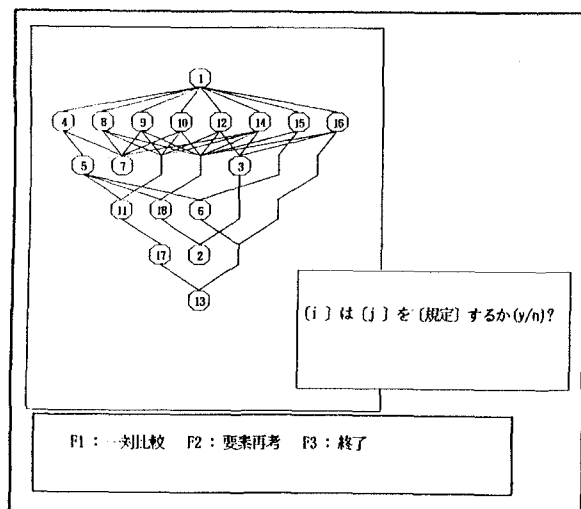


図6 操作用画面例

4. 適用事例と考察

(1) 橋梁の健全度評価のための規定要因の選定³⁾

橋梁の多くは、現在、維持・管理計画の対象となってきた。予算内で最適な維持・管理計画を策定するためには、橋梁の健全度評価が必要となる。この評価に際して、着目すべき要素を決めるためには、橋梁の健全度に影響を与える要素を抽出して、それらの間での規定関係を構造化する必要がある。この課題に対して、本システムを適用した事例について報告する。

まず、要素は、ブレーン・ストーミングによるランダム抽出で、表1に示す34個が選ばれた。「関係詞」は、「規定する」とした。この下で、一対比較を実施し、2値関係データ行列を作成した。本システムの実用システムとしての機能性の一つである見易い階層構造図の表示という面での評価を行うために、辺の交差数の改善アルゴリズムを通さないものと、通したものを示す。図7-aが前者、図7-bが後者である。前者では、交差数は139個もあり、かなり見難い図であるが、後者では交差数は9個にまで減少しており、十分に見易い図となっている。

この事例では、階層構造図は、レベル1にある評価課題には、レベル2にある3つの側面があり、それらを規定する要因がレベル3に來ていることを示

表1 橋梁の健全度評価のための要素リスト

要素番号	要素名	要素番号	要素名
1	築設年度	18	設計荷重
2	橋種	19	大型車載荷状況
3	橋格	20	超大型車
4	支間	21	交通荷重分布状況
5	幅員	22	縁端剛強
6	下部工の変化	23	パイラメント
7	荷重状況	24	地盤の流動化
8	設計耐力	25	落橋防止構造
9	地盤の良否	26	損傷状況
10	耐震設計	27	河床洗掘
11	床版の損傷	28	岩盤風化
12	主桁・主橋の損傷	29	軟弱地盤
13	床版の損傷	30	基礎工型式
14	材料劣化	31	気象条件
15	施工不良	32	地震力
16	基礎型	33	渋滞状況
17	車輪軌跡	34	大型車交通量

しているとして、ここにある7つのものが規定要因として選定された。また、これらの要因を物理的、環境的規定するものがレベル4、5にある要素で、これらのものが、調査・観察可能なデータとなるとされた。

(2) AHP法の事例の再構成

1. で述べたように、AHP法でも、階層構造図の作成がその出発点となるが、その作成にISM法が使用された例はほとんどない。ここでは、AHP法の適用研究として発表されている例を対象に、その本システムによる再構成例について報告する。

寺野氏らは、ダムゲートの安定性評価をAHP法で行っている⁷⁾。表2が、その階層構造図に使用されている要素である。ここでは、意識的に要素をランダムに並べて番号付けをした。氏らが使用されている階層構造図を再構成することが目的であるから、要素間の関係は、その図をもとに設定する。この作業では直接的な関係は網羅する必要がある。間接的な関係については、任意に加えてある。

これを本システムで処理すると交差数の改善アルゴリズムを通さない場合は、交差数は33個あり、見難いが、通した場合には、図8に示すように交差数は0となり、非常に見易い図となった。この階層構造図と、氏らの適用事例で使用されているものとは、レベル2の要素2と

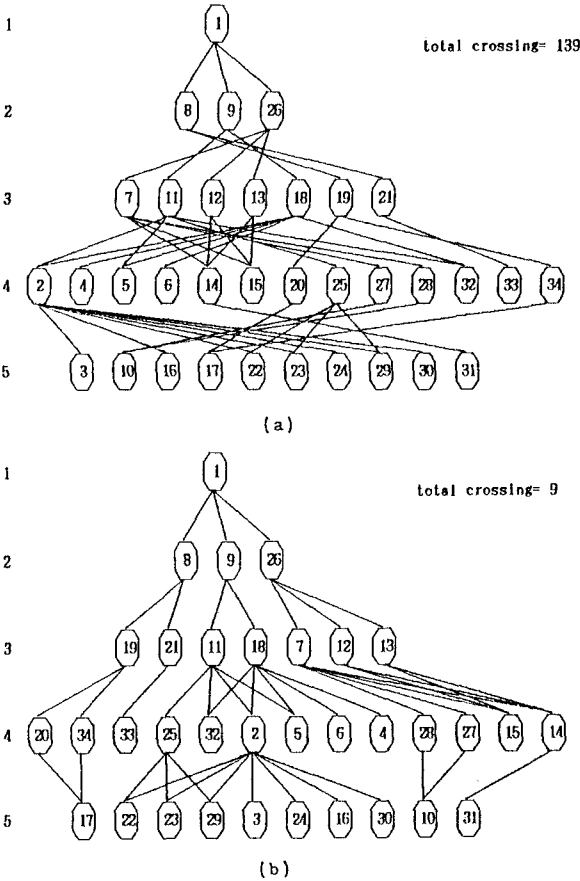


図7 橋梁の健全度評価の構造図

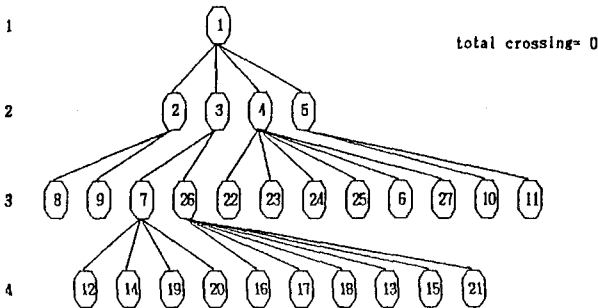


図8 ダムの安全性評価の構造図

表2 ダムの安全性評価の為の要素リスト

① 総合評価	⑩ 40年未満	⑲ 應 芥
② 操作状態	⑪ 40年以上	⑳ 変 形
③ 外観状態	⑫ 漏 水	㉑ トラス
④ 環境状態	⑬ 縦 桁	㉒ 水 質
⑤ 経過年数	⑭ 溜 水	㉓ 鉄砲水
⑥ トラブル	⑮ 横 桁	㉔ 下流域
⑦ 他の外観	⑯ 主 桁	㉕ 不安感
⑧ 片つり	⑰ 脚 柱	㉖ 腐食状態
⑨ 振 動	⑱ ブレート	㉗ 計 画

3が入れ代わっているだけである。もちろんこれにともなって、これらの要素の下にあるレベル3、4の要素群も入れ代わっている。この入れ換わりによって、中央が短いというアンバランスが消えて、より安定した構造図になっているといってもよい。

本システムでは、階層構造図を要素番号で表示しているが、当然、要素名による表示のほうが認識の深化には有効である。CRT画面上でこのことを達成することは、技術的課題としては当然検討されるべきものである。しかし、それにはハード面でのレベルアップが必要となり、1.で述べた第二の要件からは必ずしも賛成できない。この事例では、要素の一覧表をKJカード・イメージで表示した。それは、この問題は要素番号による階層構造図の配置にしたがって、このカード出力を添付することで対処できるのではと考えたからである。

5. あとがき

階層構造図の活用は、問題状況の認識支援に有効な方法である。それを作成する手段であるISM法は、使い勝手のよいシステムが整備されることによって、適用範囲が大幅に増える。本論文では、支援システムとしての機能的要件面と、利用者のアクセス面からの要件との関連で、使い勝手のよいシステム化について報告した。

機能面では、見易い構造図の提示ということで、辺の交差数の改善にBarycentric法を使用した。また、フィードバックの容易性、迅速性ということで、階層構造図を見ながら再検討をするための工夫として、ウィンドウ機能を活用することを試みた。そして、2つの事例によって、編の交差数が大幅に減少し、実用的に見て十分に見易い階層構造図が作成できることを示した。

しかし、課題もいくつかある。運用面の課題を置くとして、ソフト面では、辺の交差数の改善法についてのさらなる検討が必要である。Barycentric法には、本文中でも指摘したような問題があり、そのようなケースをより少なくする工夫が必要である。フィードバック機能面では、作業用ウィンドウでの機能の充実がさらに必要だろう。また、要素による

表示法の検討も課題の一つである。運用面での検討に加え、これらについても、今後検討したいと考えている。

参考文献

- 1) Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
- 2) 木俣 昇, 山本幸司, 竹村 哲: 除雪計画のためのコンピュータ支援システムに関する基礎的研究, 電算機利用シンポジウム論文集, 13, 107-114, 1988.
- 3) 小堀為雄, 木俣 昇, 小間井孝吉, 竹村 哲: 専門家による橋梁診断の支援コンピュータシステムに関する研究, 橋梁と基礎, 投稿中, 1990.
- 4) Langhorst, F.E.: A Structural Modeling Graphics System for Design, PhD dissertation, School of Mechanical Engineering, Purdue University, W. Lafayette, Ind., 1977.
- 5) Warfield, J.N.: Crossing theory and hierarchy mapping, IEEE. SMC-7, NO. 7, 505-523, 1977.
- 6) Sugiyama, K., Tagawa, S., Toda, M.: Methods for Visual Understanding of Hierarchical System Structures, IEEE. SMC-11, NO. 2, 109-125, 1981.
- 7) 寺野隆雄, 篠原靖志, 松井正一, 中村秀治, 松浦真一: ダムゲート診断エキスパート・システムとAHP, オペレーションズ・リサーチ, 31-8, 500-504, 1986.
- 8) Checkland, P.B.: Systems Thinking, Systems Practice, John Wiley, New York, 1981.
- 9) Warfield, J.N.: Toward Interpretation of Complex Structural Models, IEEE. SMC-4, NO. 7, 405-417, 1974.
- 10) 木俣 昇: 社会的計画システムのための視覚型, 対話型情報処理システムに関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 295, 93-102, 1980.