

橋梁の損傷要因診断事例からのラフ集合を用いた ルール型知識の獲得方法

ROUGH SET BASED RULE TYPE KNOWLEDGE ACQUISITION METHOD FROM DIAGNOSIS DATA
OF BRIDGE DAMAGE FACTORS

古田 均*, 広兼道幸**, 田中成典**, 三雲是宏***

Hitoshi FURUTA, Michiyuki HIROKANE, Shigenori TANAKA and Yukihiro MIKUMO

*工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-11 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

**工博 関西大学助教授 総合情報学部 (〒569-11 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

*** (株) ニュージェック 情報技術部 (〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

Many of the existing structures present an ever-increasing demand for maintenance and repair. It is needed in the first place to diagnose such structures correctly. The diagnoses have been dependent to date upon experts of long experience. To meet the increasing demand for maintenance and repair and perform diagnoses efficiently and correctly, the development of expert systems is hoped for. The present paper discusses the application of the rough-set theory to the acquirement of experiential knowledge contained in diagnostic cases. The rough-set theory was applied to cases in which experts diagnosed the damage of bridges, and minimum decision algorithm was derived which could make diagnoses equivalent to those by experts. Also a method of deriving rules from the minimum decision algorithm for the construction of expert systems is discussed.

Key Words : Rough set, Rule Type Knowledge Acquisition,
Diagnosis of structures, Damage of bridges

1. はじめに

現存する構造物の中には、建設後から現在に至るまでの間に、地震、台風、衝撃などの様々な外的作用によって何らかの被害を被り、使用性あるいは安全性に問題を有しているものも多い。今日、これらの既存構造物の維持管理をどのように行なっていくかは、重要な問題となっている。しかし、現状では、構造物の損傷によって、それらをすべて作り直すことは経済面からいって不可能である。そのため、現在、損傷を受けた構造物を作り直すべきか補修にとどめるべきかを適確に判断する方法を確立することが望まれている。構造物が明らかな損傷を呈している場合には、これらの判断はさほど難しくはないが、内部に重大な損傷を含んでいる場合にはかなり難しくなる。

このような複雑な損傷状況に関する判断を適切に行なうには、表面にみられる損傷の状況、あるいは、利用できる情報(損傷原因、損傷の進行状況、構造物の重要度、構造物の設計諸元、周囲の環境など)を相互に関連させ、総合的な見地から構造物の健全性を評価する必要がある。

しかしながら、健全性の評価に利用できるデータはあまいなものであり、これらのデータを種々の側面から検討し、直感や経験を基に、損傷原因や損傷の進行状況などを評価していかねばならない。このため、これまでの健全性の評価は経験豊富な専門家の直感や工学的判断に頼らざるを得ないが、維持補修の必要性が高まる一方、専門家の数は不足しているのが現状である。しかし、熟練技術者によって構造物の健全性が評価されている背景には、経験的知識をシステム化することが難しく、確立した診断方法も存在しないためであると考えられる。

そこで本論文では、観測結果に内在する経験的知識を取り扱う技術として最近注目されているラフ集合をとりあげ、その基本概念について述べる。そして、事例に内在する専門家の経験的知識の獲得に対してラフ集合を適用し、専門家の経験的知識から評価を決定付けるのに必要な知識か否かを識別しながら、評価に必要な知識を抽出して ES (エキスパートシステム) を構築する際のルールを単純化する方法について述べる^{1) 2) 3)}。実際には、専門家が橋梁の鉄筋コンクリート床版の表面上の損傷状況

から損傷要因を評価した事例⁴⁾に対してラフ集合を適用し、事例と同等の評価が下せる極小決定アルゴリズムを生成する手順を示す。生成した極小決定アルゴリズムに含まれる要因は、いずれも橋梁の損傷要因を評価するために必要であると考えられる。そこで、生成した複数の極小決定アルゴリズムに対して、ESを構築する際の「IF条件部(条件属性) THEN 結論部(決定属性)」のような知識型ルールを誘導する方法を提案する。

2. ラフ集合

ラフ集合の概念は、1982年にポーランドの計算機学者Zdzislaw Pawlakが最初に導入したもので、その本質の1つは類別にあると言うことができる^{5) 6) 7)}。人間が観測によって得られるいくつかの情報をもとに判断するとき、それらの情報の対象物(決定属性)を様々な属性(条件属性)に従って類別する作業を行っている。対象物がこの類別結果に対して同じものであれば、それらの対象物は識別することができず、同じものとして取り扱い、推論や決定を行っている。

例えば、鉄筋コンクリート床版上のひびわれ状況を識別しようとする際、「ひびわれの方向」という属性だけに注目した場合、橋軸方向のひびわれを持つ床版は違いを識別することができず、すべて同じ床版として取り扱われる。また、他の属性に注目した場合も同様で、たとえば幅員方向のひびわれを持つ床版についても違いを識別することはできず同一の床版として論じられる。この識別不能性がラフ集合の最も基本的な概念である。また、一般的に知識はこのようなものを識別することであり、経験をつめばつむほど知識は洗練されたものになる。すなわち、物事を理解し判断するためには、その物を正確に識別することが必要となり、容易に判断できる属性の種類を増やしていけば、単一の属性だけで識別できなかった対象物も識別できるようになる。

まず、表-1に示す5つの鉄筋コンクリート床版の集合 $U = \{X1, X2, X3, X4, X5\}$ を考え、そのひびわれとその属性として{方向, 量}の集合を考える。

表-1 床版のひびわれとその属性

床 版	方 向	量
X1	橋軸方向	若干ある
X2	橋軸方向	多くある
X3	幅員方向	若干ある
X4	幅員方向	多くある
X5	幅員方向	多くある

いま、{方向, 量}を属性の集合と呼び A で表し、写像

$f: U \times A \rightarrow V$ (1)

を考える。ここで、 V は属性に対する値(属性値)の集合

である。例えば、 $X1$ という床版のひびわれ方向という属性に対する属性値は橋軸方向であり、

$f(X1, \text{方向}) = \text{橋軸方向}$ (2)

となる。このとき、

$(x, y) \in R_1 \Leftrightarrow f(x, \text{方向}) = f(y, \text{方向})$ (3a)

$(x, y) \in R_2 \Leftrightarrow f(x, \text{量}) = f(y, \text{量})$ (3b)

で定義すれば、

反射律: $x \equiv x$ (4a)

対象律: $x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$ (4b)

推移律: $x \equiv y, y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$ (4c)

である3つの条件を満たしているため、 R_1 と R_2 は U において同値関係となる。ここで、 R_1 に対応する類別、すなわち R_1 の同値類の集合は、 U の R_1 に関する商集合(U/R_1)と呼ばれ、

$U/R_1 = \{\{X1, X2\}, \{X3, X4, X5\}\}$ (5a)

となる。同様に、 R_2 の同値類の集合(U/R_2)は

$U/R_2 = \{\{X1, X3\}, \{X2, X4, X5\}\}$ (5b)

となる。

すなわち、「方向」という属性に対して、「橋軸方向のひびわれ」の属性値に対する同値類は{X1, X2}であり、X1とX2の識別はできない。同様に、{X3, X4, X5}は幅員方向のひびわれを持つ床版となる。また、「量」という属性に対して、「若干ある」の2つの属性値に対する同値類は{X1, X3}であり、X1とX3の識別はできない。同様に、{X2, X4, X5}は多くのひびわれを持つ床版となる。

ここで、 R_1 の同値類の集合と R_2 の同値類の集合の共通集合を考える。すなわち、これは「方向」と「量」の2つの属性をもとに5つの床版を類別することであり、

$\{X1, X2\} \cap \{X1, X3\} = \{X1\}$ (6a)

$\{X1, X2\} \cap \{X2, X4, X5\} = \{X2\}$ (6b)

$\{X3, X4, X5\} \cap \{X1, X3\} = \{X3\}$ (6c)

$\{X3, X4, X5\} \cap \{X2, X4, X5\} = \{X4, X5\}$ (6d)

となる。ここで、式(6a)は「方向」が橋軸方向で「量」が少ない、式(6b)は「方向」が橋軸方向で「量」が多数、式(6c)は「方向」が幅員方向で「量」が少ないことを表し、該当する床版はそれぞれX1, X2, X3となる。したがって、これら3つの床版については、属性の集合 A によってすべて識別されたことになる。一方、式(6d)は「方向」が幅員方向で「量」が多数であることを表し、X4とX5の2つの床版を要素を持つ集合となる。したがって、X4とX5の2つの床版については、属性の集合 A によって識別できないことになる。このように、容易に判断できる属性を増やすことで、{X4}と{X5}以外の床版はすべて識別可能となり、ひびわれの形状もさらに特定されたものとなる。このような考え方から、ラフ集合という概念が意思決定の問題を取り扱う現実的な方法として提案されている。

3. 専門家の評価事例

本論文において、専門家の経験的知識を抽出するために使用した専門家の評価事例は、橋梁の鉄筋コンクリート床版の目視できる損傷から損傷要因を診断したものである。表-2は、この評価方法を損傷の特性から整理したものであり、表-3は、(2)～(7)のようなひびわれ状況、

(14)はく離による露出など16の判定要因を専門家の着眼点によってまとめたものである。たとえば、判定要因(2)に対しては、①多くある、②ある、③若干ある、④ない、という4つの項目があり、各判定要因に対して該当する項目の選択を総合的に評価して損傷要因(A:荷重等、B:設計・構造上、C:施工上、D:その他)を決定した。

表-2 橋梁の損傷要因とその詳細

損傷要因：A (荷重等)	損傷要因：B (設計・構造上)	損傷要因：C (施工上)	損傷要因：D (その他)
・過大な輪荷重の作用 ・衝撃作用 ・輪荷重通行位置と支持桁配置の関係	・床版厚不足による剛性不足 ・鉄筋量不足による剛性不足 ・配力鉄筋量の不足 ・主鉄筋の曲げ上げ位置の不適合 ・主桁作用の乾燥収縮による引張り応力 ・不等沈下による付加曲げモーメント ・床版の負の曲げモーメント引張り力 ・荷重分配横桁の有無	・コンクリートの低品質 ・打設時における冬場の凍結影響 ・養生の施工不良 ・施工打継目の処理不十分 ・配筋の誤差 ・かぶり不足	・気象作用による凍結、融解等の影響 ・塩分（凍結防止剤） ・表面排水の良否

表-3 専門家の着眼点による損傷要因とその判定要因

判定要因	項 目	判定要因	項 目
(1) 損傷箇所	①ハンチ部 ②支間中央 ③片持ち	(9) かぶり欠落	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(2) 橋軸方向のひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(10) 破壊	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(3) 幅員方向のひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(11) 遊離石灰流出	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(4) 縦横方向のひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(12) 漏水	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(5) 格子状のひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(13) かぶり不足による露出	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(6) 亀甲状のひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(14) はく離による露出	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(7) 貫通ひびわれ	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(15) 鉄筋発錆	①多くある ②ある ③若干ある ④なし
(8) 浮き有り	①多くある ②ある ③若干ある ④なし	(16) 鉄筋腐食	①多くある ②ある ③若干ある ④なし

表-4 は、対象とした橋梁について、判定要因に対する損傷要因の評価結果をまとめたものである。たとえば、事例 1 は判定要因(2)に対して項目番号 2 を選択し、判定要因(3)に対して項目番号 3 を選択している。総合的には損傷要因は荷重等によるものと評価されている。この表は、それぞれの事例に対して、条件属性である判定要因の項目番号と、決定属性である損傷要因の種類との関係(決定規則)をまとめたもので、以後、決定表と呼ぶ。

4. ラフ集合による極小決定アルゴリズムの抽出

4.1 損傷要因の判定要因に対する従属性

専門家の評価事例である決定表(表-4)において、個々の事例の決定規則について検討する。ここでは、すべての判定要因に対する項目番号の組み合わせが同じであるにもかかわらず、異なった損傷要因に評価されているもの、すなわち、矛盾を含む決定規則を探し、損傷要因の判定要因に対する従属性を検証する。

表-4 専門家の評価事例

事 例	判定要因																損傷要因
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
事例 1	1	2	3	2	2	2	2	2	2	1	4	2	4	1	4	4	A
事例 2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	4	2	4	4	A
事例 3	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	1	4	1	4	4	B
事例 4	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	4	1	4	4	B
事例 5	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	4	2	4	4	B
事例 6	1	1	3	1	1	1	1	2	2	1	4	2	4	1	4	4	B
事例 7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	B
事例 8	1	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	B
事例 9	1	4	2	2	2	2	2	4	4	2	2	3	4	4	4	4	B
事例 10	1	4	2	2	2	2	2	4	4	3	3	3	4	4	4	4	B
事例 11	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	C
事例 12	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	3	4	3	3	3	C
事例 13	1	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	C
事例 14	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	2	2	2	2	C
事例 15	1	4	3	3	3	3	3	2	2	2	4	4	1	1	2	2	C
事例 16	1	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	D
事例 17	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	D
事例 18	1	4	4	4	4	3	3	4	4	3	1	1	4	3	2	2	D
事例 19	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	4	2	4	2	1	1	A
事例 20	2	4	4	1	1	2	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	A
事例 21	2	4	4	4	4	2	2	4	4	2	4	4	4	4	4	4	A
事例 22	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	3	4	4	4	4	4	B
事例 23	2	1	2	2	2	2	2	4	4	4	3	4	4	4	4	4	B
事例 24	2	1	4	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	B
事例 25	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	B
事例 26	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	B
事例 27	2	2	4	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	B
事例 28	2	2	4	3	3	2	2	4	4	3	2	3	4	4	4	4	B
事例 29	2	4	4	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	B
事例 30	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2	4	4	3	3	4	4	C
事例 31	2	4	4	2	2	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	4	C
事例 32	2	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	C
事例 33	2	3	4	3	3	2	2	3	3	3	3	1	4	3	3	3	C
事例 34	2	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	2	4	4	C
事例 35	2	3	4	3	3	3	3	2	2	3	4	4	3	3	4	4	C
事例 36	2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	D
事例 37	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	D
事例 38	2	4	4	4	4	4	4	4	4	1	3	4	4	4	4	4	D

極小決定規則を抽出するためには、このような矛盾を含む決定規則を取り除いて従属性を検証し、無矛盾となる決定表を作成する必要がある。表-4 を以上の観点から検討したところ、矛盾している決定規則は存在せず、損傷要因は判定要因に従属しているということがわかる。

4.2 判定要因の絞り込み

損傷要因の評価において、影響を与えていない判定要因を見つけだし、これらを取り除くことによって影響を与えている判定要因を絞り込む必要がある。そこで、任意の判定要因を取り除き、各事例の決定規則に矛盾が含まれていないことを確認する。すなわち、条件属性であるすべての判定要因に対する項目番号が同じであるが、決定属性である損傷要因が異なっているものを評価していく。実際には取り除く判定要因の任意の組み合わせを考えて、すべての組み合わせについて試行錯誤的に判定要因から取り除き、個々の事例について矛盾が含まれているか否かを検討する。以上の検討結果より、各事例の決定規則に矛盾が含まれていない判定要因の組み合わせを1つ1つ検証した結果、表-5 に示すようにCASE1 からCASE60 までの60 通りが、矛盾の含まれない組み合わせとなった。CASE1 とCASE2 は、4つの判定要因の組み合わせから損傷要因を評価する決定表であり、CASE3 からCASE60 は、5つの判定要因の組み合わせから損傷要因を評価する決定表である。したがって、本論文で使用した橋梁の損傷要因の評価に関する観測データについては、これらの判定要因の組み合わせで、矛盾なく損傷要因が類別できることになる。これらの判定要因の組み合わせの中から、CASE1 を例として取り上げ、極小決定アルゴリズムを抽出する方法について説明する。

表-5 のCASE1 に示す (3), (4), (10), (14) 以外の判定要因を表-4 から取り除き、決定属性の条件属性に対する従属性を検討していくとともに同一決定規則を持つ事例を取り除くと、表-6 に示すあらたな決定表を得ることができる。

4.3 判定要因に対する項目の絞り込み

得られた決定表(表-6)を使って、すべての判定要因に対する1つ1つの項目について検討する必要がある。ここでは、項目番号を1つ1つ取り除き、決定表に矛盾が含まれているか否かを検討する。ある項目番号を取り除き決定表の中に矛盾が生じた場合、取り除いた項目番号は損傷要因の評価に影響を与えるものと判断することができる。逆に、矛盾が生じなかった場合、その項目番号は損傷要因の評価に影響を与えていないものと判断することができる。最終的に、表-7 に示すあらたな決定表を得ることができる。

表-7における「-」部の項目番号は取り除いても矛盾が生じず、表-6 の決定表と同等の評価が可能である。このようにして得られた決定表は、判定要因や項目番号を1つでも取り除くと矛盾が生じて、これ以上、小さくすることができない決定表であり、極小決定アルゴリズムと呼ばれるものである。

同様に、たとえばCASE60 の場合には、表-8 に示すあらたな決定表を得ることができる。表-7 と表-8 を比較すると、取り除かれた後の判定要因に対する項目番号の数は表-8 のほうが少ないことがわかる。これは、最も極小な決定表を導く場合には、判定要因の数が最小となる組み合わせだけを対象に考慮すべきでないことを示している。

表-5 絞り込まれた判定要因

ケース	判 定 要 因	ケース	判 定 要 因	ケース	判 定 要 因
CASE 1	(3) (4) (10) (14)	CASE 2	(3) (5) (10) (14)	CASE 3	(1) (3) (4) (10) (14)
CASE 4	(1) (3) (5) (10) (14)	CASE 5	(1) (4) (10) (11) (14)	CASE 6	(1) (4) (10) (13) (14)
CASE 7	(1) (5) (10) (11) (14)	CASE 8	(1) (5) (10) (13) (14)	CASE 9	(1) (6) (9) (11) (14)
CASE10	(2) (3) (4) (10) (14)	CASE11	(2) (3) (5) (10) (14)	CASE12	(2) (3) (9) (10) (14)
CASE13	(2) (4) (10) (11) (14)	CASE14	(2) (5) (10) (11) (14)	CASE15	(3) (4) (5) (10) (14)
CASE16	(3) (4) (6) (10) (14)	CASE17	(3) (4) (6) (11) (14)	CASE18	(3) (4) (7) (10) (14)
CASE19	(3) (4) (8) (10) (14)	CASE20	(3) (4) (9) (10) (14)	CASE21	(3) (4) (10) (11) (14)
CASE22	(3) (4) (10) (12) (14)	CASE23	(3) (4) (10) (13) (14)	CASE24	(3) (4) (10) (14) (14)
CASE25	(3) (4) (10) (14) (16)	CASE26	(3) (5) (6) (10) (14)	CASE27	(3) (5) (6) (11) (14)
CASE28	(3) (5) (7) (10) (14)	CASE29	(3) (5) (8) (10) (14)	CASE30	(3) (5) (9) (10) (14)
CASE31	(3) (5) (10) (11) (14)	CASE32	(3) (5) (10) (12) (14)	CASE33	(3) (5) (10) (13) (14)
CASE34	(3) (5) (10) (14) (15)	CASE35	(3) (5) (10) (14) (16)	CASE36	(3) (6) (9) (10) (14)
CASE37	(3) (6) (9) (11) (14)	CASE38	(3) (7) (8) (10) (14)	CASE39	(3) (7) (9) (10) (14)
CASE40	(4) (6) (8) (11) (14)	CASE41	(4) (6) (9) (11) (14)	CASE42	(4) (7) (8) (11) (14)
CASE43	(4) (7) (9) (11) (14)	CASE44	(4) (8) (10) (11) (14)	CASE45	(4) (8) (10) (13) (14)
CASE46	(4) (9) (10) (11) (14)	CASE47	(4) (9) (10) (13) (14)	CASE48	(4) (10) (11) (12) (14)
CASE49	(4) (10) (12) (13) (14)	CASE50	(5) (6) (8) (11) (14)	CASE51	(5) (6) (9) (11) (14)
CASE52	(5) (7) (8) (11) (14)	CASE53	(5) (7) (9) (11) (14)	CASE54	(5) (8) (10) (11) (14)
CASE55	(5) (8) (10) (13) (14)	CASE56	(5) (9) (10) (11) (14)	CASE57	(5) (9) (10) (13) (14)
CASE58	(5) (10) (11) (12) (14)	CASE59	(5) (10) (12) (13) (14)	CASE60	(6) (9) (10) (11) (14)

表-6 絞り込まれた決定表 (CASE1)

事例	判定要因				損傷要因
	(3)	(4)	(10)	(14)	
事例1	3	2	1	1	A
事例2	2	2	2	2	A
事例3	2	1	1	1	B
事例5	1	1	2	2	B
事例6	3	1	1	1	B
事例7	4	4	4	4	B
事例8	2	2	4	4	B
事例9	2	2	2	4	B
事例10	2	2	3	4	B
事例11	3	3	3	3	C
事例12	3	3	2	3	C
事例13	3	3	2	2	C
事例14	3	3	3	2	C
事例15	3	3	2	1	C
事例16	3	3	4	4	D
事例17	4	4	3	3	D
事例18	4	4	1	3	D
事例19	2	1	2	2	A
事例20	4	1	2	4	A
事例21	4	4	2	4	A
事例24	4	2	4	4	B
事例28	4	3	3	4	B
事例31	4	2	2	4	C
事例32	3	2	3	4	C
事例33	4	3	3	3	C
事例34	4	4	3	2	C
事例36	3	4	4	4	D
事例38	4	4	1	4	D

表-7 CASE1における極小決定アルゴリズム

事例	判定要因				損傷要因
	(3)	(4)	(10)	(14)	
事例1	-	2	-	1	A
事例2	-	2	-	2	A
事例3	-	1	-	1	B
事例5	-	1	2	2	B
事例7	4	-	4	4	B
事例8	-	2	4	-	B
事例9	2	-	-	4	B
事例11	-	3	-	3	C
事例12	-	-	2	3	C
事例13	-	3	-	2	C
事例14	-	-	3	2	C
事例15	-	-	2	1	C
事例16	-	3	4	-	D
事例17	-	-	4	3	D
事例18	-	4	-	3	D
事例19	-	-	1	2	A
事例20	-	1	-	4	A
事例21	-	4	2	-	A
事例28	-	3	3	4	B
事例31	4	2	2	-	C
事例32	3	-	3	-	C
事例36	3	-	4	-	D
事例38	-	-	1	4	D

表-8 CASE60における極小決定アルゴリズム

事例	判定要因					損傷要因
	(6)	(9)	(10)	(11)	(14)	
事例1	2	-	-	-	1	A
事例2	-	-	2	4	2	A
事例3	-	-	-	2	1	B
事例5	-	-	-	1	2	B
事例6	1	-	-	-	1	B
事例7	4	-	-	4	4	B
事例8	2	-	4	-	-	B
事例9	-	-	-	2	4	B
事例10	-	4	3	-	4	B
事例11	-	3	-	-	-	C
事例12	-	-	2	-	3	C
事例13	-	-	-	2	2	C
事例15	-	-	2	-	1	C
事例16	3	-	-	-	4	D
事例17	-	-	4	-	3	D
事例18	-	-	-	1	3	D
事例19	-	-	1	-	2	A
事例20	-	2	-	-	4	A
事例21	-	4	2	4	-	A
事例36	4	-	-	3	-	D
事例38	-	-	1	-	4	D

5. 極小決定アルゴリズムの評価

図-1は、表-5に示す絞り込まれた決定表に必要なとされる各判定要因の出現頻度を、棒グラフで表したものである。判定要因(14)は、CASE1~CASE60の多数の決定表において必要とされ、出現頻度は61となる。また、判定要因(15)は、CASE34の決定表においてのみ必要とされ、出現頻度は1となる。図-1において、出現頻度の多い順に判定要因をあげると、「(14)鉄筋腐食」、「(10)破壊」、「(3)幅員方向のひびわれ」、「(4)縦横方向のひびわれ」、「(5)格子状のひびわれ」の順となる。

これらの出現頻度の高い判定要因の重要性について、専門家の診断結果と照合して検証を行うことで、極小決定アルゴリズムの評価も行うことができる。

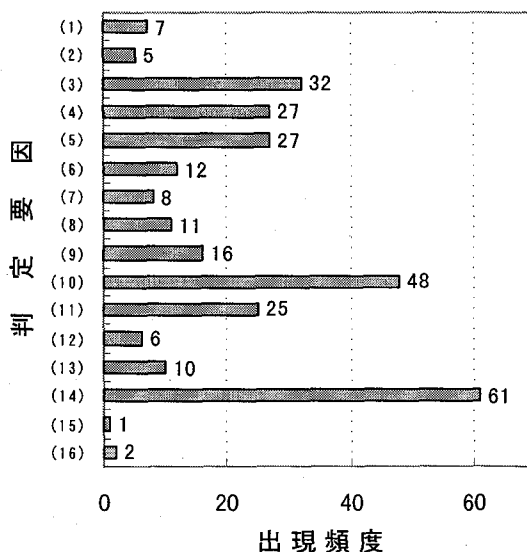


図-1 各判定要因の出現頻度

6. ルールの記述

生成された極小決定アルゴリズムは、「IF 条件部（条件属性） THEN 結論部（決定属性）」のようなルールで容易に記述することができる。ここで、CASE1 の極小決定アルゴリズムは、表-7 をもとにすると表-9 に示すような 23 のルールで記述することができる。

例えば、表-7 における事例 1 の決定規則は、条件属性である判定要因(4)、(14)に対する該当する項目がそれぞれ 2、1 であれば、決定属性である損傷要因が A であることを示している。したがって、これをルールで記述すると、

IF (4) = 2 and (14) = 1 THEN 損傷要因 = A
となる。

同様に、事例 2 の決定規則をルールで記述すると、

IF (4) = 2 and (14) = 2 THEN 損傷要因 = A
となる。

このようにして、すべての事例について得られたルールをもとに ES を構築することができ、システムを実行して結論部である損傷要因を決定できる。ただし、すべての条件部が成立するか否かを評価する必要がある。また、ES を構築する際のルール数は、知識の更新などを考慮して少なくなるように考慮し、効率化や推論時間の短縮化を図る必要がある。これにより、CASE1～CASE60 の中でルール数が最も少なくなるケースの極小決定アルゴリズムから前述のようなルール記述で妥当な決定規則を誘導することになる。

7. あとがき

ラフ集合の考え方に基づき、専門家が行った橋梁の損傷要因を評価した事例に内在する経験的知識を極小決定アルゴリズムという決定表の形で抽出する方法を提案した。さらに、専門家の経験的知識として抽出された極小決定アルゴリズムから、ES を構築する際に必要となるルールを誘導する方法についても提案した。

本研究における検討で、明らかになったことを以下に記す。

- ① 専門家が橋梁の損傷要因を評価した事例から、実際に極小決定アルゴリズムを抽出し、損傷要因の評価に必要な判定要因を見つけ出すことができた。
- ② 決定表の考え方は、ある条件が満たされたとき、どのような決定を下すべきかを規定したものである。何らかの決定を下す必要がある意思決定の問題のほとんどが、前述のような決定表によって定式化することができる。

- ③ 事例から極小決定アルゴリズムを抽出する際、矛盾が生じないように判定要因を取り除いた結果、4 つの判定要因の組み合わせから損傷要因を評価する決定表と 5 つの判定要因の組み合わせから損傷要因を評価する決定表が得られた。4.3 節で述べたように、項目を取り除く方法でさらに極小な決定表を導く場合には、判定要因の数が最小となる組み合わせだけを対象にすべきでないということが考えられる。

- ④ 判定要因を取り除いたときに生じる矛盾を検討することで、使用した損傷要因の評価事例に対して、取り除いた判定要因が影響を与えているか否かを判断することができる。前述のようにして抽出された判定要因に対して主観的判断が必要とされる場合は、ファジ理論を適用して ES の構築を考えることができ、ラフ集合の判定要因の絞り込みの考え方は、ES を構築する際の困難かつ重要な課題を解決するためにも有効であると考えられる。

以上を総括すると、ラフ集合は、結論となる損傷要因の集合が、判定要因と選択項目との対をなす集合で、どのように表現できるかという問題から出発しているため、既存の評価型の事例から知識を獲得するための 1 つの方法として適用することができる。

また、ラフ集合の適用に対して考えられる今後の課題を以下に記す。

- ① 本研究では、専門家が行った橋梁の損傷要因を評価した事例にラフ集合を適用し、事例に内在する経験的知識を抽出してルール型知識を誘導する方法を示したが、実際の事例のうち限られたデータを対象としている。今後は、より多数の事例から構成されている実際のデータを対象として検討をすすめる必要がある。
- ② ①で述べたように事例数が大きくなるため、極小決定アルゴリズムを抽出する際に、取り除く判定要因の組み合わせを遺伝的アルゴリズムなどを適用することによって操作を効率化する方法を検討する必要がある。
- ③ 橋梁の損傷要因を評価した事例から判定要因を取り除くことによって、評価に重要な判定要因を定義付ける方法を示したが、各々の判定要因の重要度については考慮していない。今後は、各々の判定要因の重要度を考慮した方法を考案する必要がある。

表-9 極小決定アルゴリズムのルールによる記述例 (CASE1)

事 例	ルール番号	ルール型記述			
事例 1	1	IF	(4)= 2 and (14)= 1	THEN	損傷要因= A
事例 2	2	IF	(4)= 2 and (14)= 2	THEN	損傷要因= A
事例 3	3	IF	(4)= 1 and (10)= 1	THEN	損傷要因= B
事例 5	4	IF	(4)= 1 and (10)= 2 and (14)= 2	THEN	損傷要因= B
事例 7	5	IF	(3)= 4 and (10)= 4 and (14)= 4	THEN	損傷要因= B
事例 8	6	IF	(4)= 2 and (14)= 4	THEN	損傷要因= B
事例 9	7	IF	(3)= 2 and (14)= 4	THEN	損傷要因= B
事例 1 1	8	IF	(4)= 3 and (14)= 3	THEN	損傷要因= C
事例 1 2	9	IF	(10)= 2 and (14)= 3	THEN	損傷要因= C
事例 1 3	10	IF	(4)= 3 and (14)= 2	THEN	損傷要因= C
事例 1 4	11	IF	(10)= 3 and (14)= 2	THEN	損傷要因= C
事例 1 5	12	IF	(10)= 2 and (14)= 1	THEN	損傷要因= C
事例 1 6	13	IF	(4)= 3 and (10)= 4	THEN	損傷要因= D
事例 1 7	14	IF	(10)= 4 and (14)= 3	THEN	損傷要因= D
事例 1 8	15	IF	(4)= 4 and (14)= 3	THEN	損傷要因= D
事例 1 9	16	IF	(10)= 1 and (14)= 2	THEN	損傷要因= A
事例 2 0	17	IF	(4)= 1 and (14)= 4	THEN	損傷要因= A
事例 2 1	18	IF	(4)= 4 and (10)= 2	THEN	損傷要因= A
事例 2 8	19	IF	(4)= 3 and (10)= 3 and (14)= 4	THEN	損傷要因= B
事例 3 1	20	IF	(3)= 4 and (4)= 2 and (10)= 2	THEN	損傷要因= C
事例 3 2	21	IF	(3)= 3 and (10)= 3	THEN	損傷要因= C
事例 3 6	22	IF	(3)= 3 and (10)= 4	THEN	損傷要因= D
事例 3 8	23	IF	(10)= 1 and (14)= 4	THEN	損傷要因= D

(謝辞)

本研究は、平成9年度関西大学重点領域研究助成金の補助を得て実施された。関係諸氏に対し深く感謝致します。

参考文献

- 1) 古田均, 田中洋: 構造工学へのファジィ理論の応用, 日本ファジィ学会誌, 日本ファジィ学会, Vol. 2, No. 3, pp276-288, 1990. 8.
- 2) 馬野元秀: ファジィ理論からのエキスパートシステム, 土木工学へのエキスパートシステムの適用と可能性, pp. 15-26, 1992.
- 3) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫: ファジィシステム入門, オーム社, 1987.
- 4) 三上市蔵, 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システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 34A, pp. 551-562, 1988. 3.
- 5) Pawlak, Z.: Rough Sets, International Journal of Computer and Information Science, Vol.11, pp.341-356, 1982.
- 6) Pawlak, Z.: Rough Sets—Theoretical Aspects of Reasoning about Data, Kluwer Acad. Pub., 1991.
- 7) Ziarko, P.: Rough Sets, Fuzzy Sets and Knowledge Discovery, Springer-Verlag, 1994.

(1997年9月26日受付)