

斜面の崩壊危険度診断事例からの ラフ集合を用いたルール型知識の抽出方法

広兼道幸¹・古田 均²・中井真司³・三雲是宏⁴

¹正会員 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)

²正会員 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)

³正会員 学修 復建調査設計株式会社 地質調査部 (〒732 広島県広島市東区光町 2-10-11)

⁴正会員 ニュージェック 情報技術部 (〒542 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

観測データに基づく意思決定問題を取り扱うための基礎技術として最近注目されているラフ集合の基本的な概念についてまとめ、実際に、斜面の崩壊危険度診断のデータを用いて、極小決定アルゴリズムを生成し、診断結果に内在する経験的知識の獲得方法を提案した。

生成した極小決定アルゴリズムに含まれる要因は、いずれも専門家が斜面の崩壊危険度を診断する際、特に重要視して評価したものであると考えることができる。そこで、複数の極小決定アルゴリズムについて、エキスパートシステムを構築する際の知識としての妥当性を評価する方法について述べ、この結果を用いてルールを誘導する方法を提案する。

Key Words : *slope-failure, observation data, rough set, knowledge acquisition, rule-based system*

1. はじめに

台風時期や梅雨時期の豪雨によって引き起こされる斜面崩壊は、人命をも奪い、大きな被害を全国各地でもたらしている^{1),2)}。これらの被害を防ぐためには、適切な時期に適切な箇所に対して、適切な対策工を施工する必要がある。適切な対策工は、地質、土質、工費、および景観などを考慮し、崩壊に耐えうる構造を有する対策工が選定されるべきであり、対策工を施工する箇所を十分に調査した上で決定する必要がある³⁾。また、対策工を施工すべき適切な時期や箇所は、保全対象や崩壊の危険性を総合的に評価して決定すべきであり、被害を最小限にとどめるためにも、斜面の崩壊危険度を適確に評価することが重要となる。

斜面崩壊は様々な要因が複雑に作用して発生するもので、多くの要因の一部のみに着目した方法⁴⁾、統計的な方法⁵⁾、力学的な方法⁶⁾など斜面の崩壊危険度を診断するいくつかの方法が提案されている。しかし、地方自治体などで進めている防災計画は、これらの診断方法とはまったく別に、その地域を熟知した専門家の経験的知識によって、危険度の診断が行われている

のが現状である。

このような経験的知識によって危険度の診断が行われている背景には、専門家の経験的知識を、従来より提案されてきた方法に組み込むことが困難であり、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。また、各省庁や団体によって、斜面崩壊危険度の診断方法^{7),8),9)}が提案されているが、いずれの診断方法も適用にあたっては、専門家の経験的知識を必要とし、土木技術者が誰でも容易に取り扱えるわけではない。

このような状況の中で、専門家の経験的知識に基づく診断方法を確立するために、エキスパートシステム(以下、ESと略す)の適用に関する研究が行われている^{10),11)}。これらの研究は、ファジ理論を適用して、専門家の経験的知識に含まれる曖昧さを取り込み、診断システムを構築したものである。しかし、ファジ理論の適用にあたっては、どの部分をファジ化するかという極めて困難かつ重要な課題を解決する必要がある。すなわち、斜面崩壊の例に見られる様々な要因をすべてファジ化して診断システムに組み込むと、最終的な危険度の診断結果が極めて信頼性の劣るものとなる可能性も存在するからである¹²⁾。

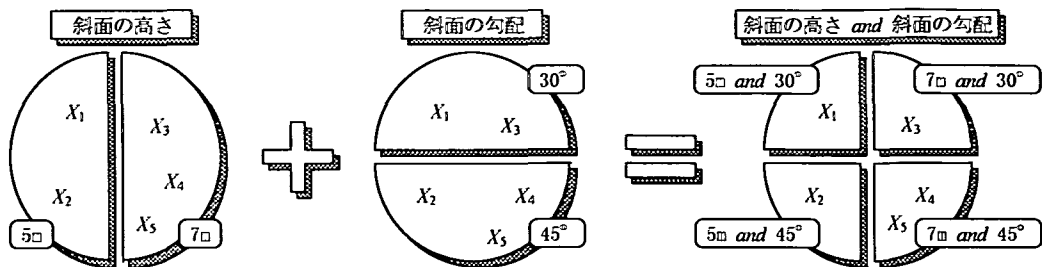


図-1 ラフ集合の概念図

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^{13),14)}の基本概念について説明し、事例に内在する経験的知識の獲得におけるラフ集合の適用方法について述べる。実際には、専門家が道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断した事例に対してラフ集合を適用し、判定要因や判定要因に対する項目を取り除き、事例と同等の診断が矛盾なく下せる極小決定アルゴリズムを生成した。生成した極小決定アルゴリズムに含まれる要因は、専門家が斜面の崩壊危険度を診断する際、特に重要視して評価したものであると考えられる。そこで、複数の極小決定アルゴリズムに対して、ESを構築する際の知識としての妥当性を評価する方法について述べ、この結果を用いて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¹⁵⁾もので、その本質の1つは類別¹⁶⁾にあるとすることができる。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、推論したり決定したりしている。例えば、斜面の形状を識別しようとする際、「斜面の高さ」という属性だけに着目した場合、同じ5mの高さを持つ斜面は識別できず、すべて同じものとして取り扱われる。同様に、7mの高さを持つ斜面についても同一物として論じられる。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、これまで識別できなかった対象物も識別できるようになる。

図-1は、 $U = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ を斜面の集合と考え、これらの斜面を「高さ」と「勾配」という2つの属性に基づき類別することを例として、ラフ集合の概念を説明したものである。いま、{高さ, 勾配}を属性の集合と呼び A で表し、写像

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

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、 X_1 という斜面に対する「高さ」という属性の属性値は5mであり、

$$f(X_1, \text{高さ}) = 5m \quad (2)$$

となる。ここで、関係 $R_1, R_2 (\subseteq U \times A)$ を

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

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

で定義すれば、任意の $x, y, z \in U$ に対して、

$$\text{反射律: } x \equiv x \quad (4a)$$

$$\text{対象律: } x \equiv y \Rightarrow y \equiv x \quad (4b)$$

$$\text{推移律: } x \equiv y, y \equiv z \Rightarrow x \equiv z \quad (4c)$$

なる3つの条件が成立するため、 R_1 と R_2 は U における同値関係となる。ここで、 R_1 に対応する類別、すなわち、 U の R_1 に関する商集合(U/R_1)と呼ばれる R_1 の同値類の集合は、

$$U/R_1 = \{\{X_1, X_2\}, \{X_3, X_4, X_5\}\} \quad (5a)$$

となる。同様に、 R_2 の同値類の集合(U/R_2)は

$$U/R_2 = \{\{X_1, X_3\}, \{X_2, X_4, X_5\}\} \quad (5b)$$

となる。

すなわち、「高さ」という属性に対応する類別において、属性値が5mである同値類は $\{X_1, X_2\}$ となり、 X_1 と X_2 は5mの高さを持つ斜面として識別できない。同様に、 $\{X_3, X_4, X_5\}$ は7mの高さを持つ斜面となる。また、「勾配」という属性に対応する類別において、属性値が 30° である同値類は $\{X_1, X_3\}$ となり、 X_1 と X_3 は 30° の勾配を持つ斜面として識別できない。同様に、 $\{X_2, X_4, X_5\}$ は 45° の勾配を持つ斜面となる。

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($U/R_1 \cap U/R_2$)を考える。すなわち、これは「高さ」と「勾配」の2つの属性をもとに5箇所の斜面を類別することであり、

$$\{X_1, X_2\} \cap \{X_1, X_3\} = \{X_1\} \quad (6a)$$

表-1 崩壊危険度の判定要因

判定要因	項目	危険ランク
(1) 崩壊地の有無	① 大規模崩壊地がある	a
	② 崩壊地が多くある	b
	③ 崩壊地が少しある	c
	④ 崩壊地がない	d
(2) 崩壊前兆の有無	① 段落ち、亀裂、構造物の変位などの前兆がある	a
	② 上記の前兆がない	b
(3) 崖錘など不安定土塊の存在状況	① 厚く存在する	a
	② 薄く存在する	c
	③ 存在しない	d
(4) 風化、変質の激しい岩の有無	① 風化、変質の激しい岩があり、上部は集水地形	a
	② 風化、変質の激しい岩があるが、①以外の場合	c
	③ 風化、変質の激しい岩がない	d
(5) 破砕帯の有無	① 破砕帯がある	b
	② 破砕帯がない	d
(6) 斜面の勾配	① オーバーハング状	a
	② 35° 以上	b
	③ 25° ~35°	c
	④ 25° 以下	d
(7) ガリーの有無	① ある	b
	② ない	d
(8) 斜面上沢状窪みの有無	① 沢状窪みの出口が道路より上部に位置する	a
	② 沢状部の表土、風化土が周辺部より比較的厚い	b
	③ 沢状窪みはあるが、②以外の場合	c
	④ 沢状窪みがない	d
(9) 斜面上部地形	① 凹型 (集水地形)	b
	② 平型	c
	③ 凸型	d
(10) 斜面の縦断形	① オーバーハング状	a
	② 斜面途中および上部に平坦部がある	b
	③ 明瞭な遷急点、遷緩点がある	c
	④ ①~③以外	d
(11) 湧水の状況	① 多量の湧水がある	b
	② 浸み出し程度の湧水がある	c
	③ 湧水がない	d
(12) 道路による斜面の切り取り状況	① 厚い不安定土塊を切り取っている	b
	② 風化、変質の激しい岩盤を切り取っている	c
	③ 比較的新鮮な岩盤を切り取っている	d

$$\{X_1, X_2\} \cap \{X_2, X_4, X_5\} = \{X_2\} \quad (6b)$$

$$\{X_3, X_4, X_5\} \cap \{X_1, X_3\} = \{X_3\} \quad (6c)$$

$$\{X_3, X_4, X_5\} \cap \{X_2, X_4, X_5\} = \{X_4, X_5\} \quad (6d)$$

となる。ここで、式(6a)は X_1 が高さ5mかつ勾配30°、式(6b)は X_2 が高さ5mかつ勾配45°、式(6c)は X_3 が高さ7mかつ勾配30°であることを表し、これら3つの斜面については、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 X_4 と X_5 が高さ7mかつ勾配45°であることを表し、 X_4 と X_5 の2つの斜面については、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、 $\{X_4, X_5\}$ 以外の斜面はすべて識別可能となり、斜面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. 専門家の診断事例

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診断事例は、粘板岩を主体とする道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断したものである。危険度の診断は高速道路調査会の診断方法⁹⁾に従っている。表-1は、この診断方法を地質(粘板岩)や地形などの特性から、すべての斜面について選択される項目が共通となる判定要因は除外し、(1)崩壊地の有無、(2)崩壊前兆の有無など12の判定要因にまとめたものである。判定要因(1)に対しては、①大規模崩壊地がある、②崩壊地が多くある、③崩壊地が少しある、④崩

表-2 専門家の診断事例

斜面 番号	判 定 要 因												危険度
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1	②	①	①	②	②	②	②	④	②	②	③	①	A
2	④	②	①	②	②	②	②	④	②	②	②	①	B
3	③	②	②	③	②	②	②	④	③	④	③	②	C
4	④	②	①	②	①	③	②	②	②	③	③	③	B
5	③	②	①	①	②	②	②	④	①	③	③	①	A
6	③	①	①	①	②	②	②	④	③	②	①	①	A
7	④	②	②	②	②	②	②	④	②	④	③	③	C
8	④	②	②	②	②	②	②	④	②	④	③	③	C
9	③	①	①	②	②	④	②	③	①	④	③	③	B
10	③	①	①	③	②	④	②	③	①	④	③	③	B
11	④	②	①	③	②	④	②	④	②	③	③	③	C
12	④	②	①	③	②	④	②	③	①	③	③	③	B
13	④	②	①	③	②	②	②	④	②	③	①	①	B
14	③	②	②	③	②	②	①	④	①	④	②	③	B
15	④	②	①	③	②	④	①	④	②	④	③	③	C
16	④	②	①	③	②	②	②	④	③	④	①	①	B
17	④	①	①	③	②	④	②	③	①	③	②	③	B
18	③	②	①	③	②	②	①	④	②	③	③	①	B
19	④	②	①	③	②	②	②	④	②	③	③	①	C
20	④	②	①	③	②	③	②	③	①	③	③	③	B
21	③	①	①	③	②	②	②	④	②	③	③	③	B
22	④	②	②	③	②	②	②	④	③	③	③	③	C
23	④	②	②	③	②	③	①	④	①	③	③	③	C
24	④	①	①	②	②	④	②	③	①	④	③	①	B
25	④	②	②	①	①	②	②	④	①	④	①	①	A
26	④	②	②	②	②	②	①	③	①	④	①	①	B
27	④	①	②	③	②	②	②	④	③	④	③	③	C
28	②	①	①	①	①	②	②	④	②	④	③	①	A
29	②	①	①	①	①	②	②	④	②	④	③	①	A
30	②	①	①	①	②	②	①	④	③	③	③	②	A
31	③	①	①	②	②	②	①	④	①	③	②	①	A
32	④	②	②	②	②	②	②	④	③	③	③	②	C

壊地がない、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行う。選択した項目に対応する危険ランク (a, b, c, d) を数量化し、その合計得点より各斜面の総合的な危険度 (A, B, C) を診断する点数制を採っている³⁾。

表-2 は、ある地域の32箇所の斜面について、判定要因に対する選択した項目番号と総合的な危険度の診断結果をまとめたものである。例えば、斜面番号1は判定要因(1)に対して項目番号②を選択し、判定要因(2)に対して項目番号①を選択している。すべての要因に対する選択した項目から、対応する危険ランクをもとに点数制で危険度Aと診断されている。この表は、それぞれの斜面に対して、条件属性である判定要因の項目番号と決定属性である危険度との関係(決定規則)をまとめたもので、以後、決定表と呼ぶ。

4. 極小決定アルゴリズムの生成

(1) 危険度の判定要因に対する従属性

最初に、専門家の診断事例である決定表(表-2)において、決定属性である危険度が条件属性である12の判定要因に從属しているか否かを検討する必要がある。個々の斜面の決定規則について検討して、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、異なった危険度に診断されているもの、すなわち、矛盾を含む決定規則を抽出する。もし、ここで同じ項目番号の組み合わせから異なった危険度に診断されている斜面が存在するならば、斜面の崩壊危険度を決定するためには、ここで取り上げた12の判定要因だけでは適確な診断を行うことができないと考え、あらたな判定要因を追加するか、あるいは各判定要因に対する選択項目の再検討が必要となる。また、

表-3 判定要因(8),(9)を取り除いた決定表

斜面 番号	判 定 要 因										危険度
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(10)	(11)	(12)	
1	②	①	①	②	②	②	②	②	③	①	A
2	④	②	①	②	②	②	②	②	②	①	B
3	③	②	②	③	②	②	②	④	③	②	C
4	④	②	①	②	①	③	②	③	③	③	B
5	③	②	①	①	②	②	②	③	③	①	A
6	③	①	①	①	②	②	②	②	①	①	A
7	④	②	②	②	②	②	②	④	③	③	C
9	③	①	①	②	②	④	②	④	③	③	B
10	③	①	①	③	②	④	②	④	③	③	B
11	④	②	①	③	②	④	②	③	③	③	C*
12	④	②	①	③	②	④	②	③	③	③	B*
13	④	②	①	③	②	②	②	③	①	①	B
14	③	②	②	③	②	②	①	④	②	③	B
15	④	②	①	③	②	④	①	④	③	③	C
⋮											⋮
32	④	②	②	②	②	②	②	③	③	②	C

極小決定アルゴリズムを生成していくためには、当面、このような矛盾を含む決定規則を取り除き、無矛盾となる決定表を作成する必要がある。

そこで、表-2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、危険度は判定要因に従属しているということがわかる。また、表-2の決定表の中に同一の決定規則が含まれている場合、これらの決定規則については、いずれか1つの決定規則を評価していけばよい。そこで、斜面番号7と8、および斜面番号28と29に対する崩壊危険度の診断は、それぞれ同一の決定規則に従っており、表-2における網掛け部の斜面番号8と29の決定規則については、この表から削除して、あらたな決定表を得ることができる。

(2) 判定要因の取り除き

次に、崩壊危険度の診断において、影響を与えていない判定要因を見つけ出す必要がある。そこで、表-2(網掛け部を除く)から任意の判定要因を取り除き、各斜面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、条件属性である判定要因に対する項目番号がすべて同じであるにもかかわらず、決定属性である危険度が異なっているものを評価していく。

例えば、判定要因(8),(9)を取り除き、表-3に示すあらたな決定表を作成して、この決定表に矛盾が含まれているか否かについて、すべての斜面に対する決定規則を検討していく。ここで、矛盾が含まれていれば、表-2(網掛け部を除く)の決定表において、判定要因(8),(9)のいずれかは危険度の診断に影響を与える必

要な要因であり、同時に取り除くことはできないことになる。実際に、表-3においては、危険度の欄に"*"を付した斜面番号11と12の決定規則に矛盾が生じている。したがって、表-2における斜面の崩壊危険度は判定要因(8),(9)のいずれかに従属していると言うことができる。

以上のように、判定要因の組み合わせを考えて、これらの判定要因を同時に取り除き、各斜面の決定規則に矛盾が含まれているか否かを検討する。このとき、この組み合わせの数は

$$\sum_{k=1}^{12} \binom{12}{k} = 4094 \tag{7}$$

で計算でき、すべての組み合わせを考えると4094通りの取り除き方が考えられる。これらの取り除き方すべてについて矛盾の有無を検討したところ、すべての斜面の決定規則に矛盾が生じず、かつ判定要因の数が最小となる組み合わせは、表-4に示すようにCASE-1からCASE-9までの9通りとなった。これらは、いずれも5つの判定要因の組み合わせから、危険度を診断する決定表を表す。したがって、本論文で使用した専門家の診断事例については、これらの判定要因の組み合わせで、矛盾なく危険度が識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、CASE-1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-4のCASE-1に示す(1),(2),(8),(9),(11)以外の判定要因を表-2(網掛け部を除く)から取り除くと、表-5に示すあらたな決定表を得ることができる。

表-4 判定要因の組み合わせ

ケース	判定要因				
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)
CASE-1	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)
CASE-2	(1)	(3)	(4)	(8)	(11)
CASE-3	(1)	(3)	(4)	(9)	(11)
CASE-4	(1)	(3)	(8)	(9)	(11)
CASE-5	(1)	(4)	(8)	(9)	(11)
CASE-6	(1)	(4)	(8)	(10)	(11)
CASE-7	(1)	(4)	(8)	(11)	(12)
CASE-8	(1)	(8)	(9)	(10)	(11)
CASE-9	(1)	(8)	(9)	(11)	(12)

表-5 判定要因を取り除いた決定表 (CASE-1)

斜面番号	判定要因					危険度
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)	
1	②	①	④	②	③	A
2	④	②	④	②	②	B
3	③	②	④	③	③	C
4	④	②	②	②	③	B
5	③	②	④	①	③	A
6	③	①	④	③	①	A
7	④	②	④	②	③	C
9	③	①	③	①	③	B
10	③	①	③	①	③	B
11	④	②	④	②	③	C
12	④	②	③	①	③	B
13	④	②	④	②	①	B
14	③	②	④	①	②	B
15	④	②	④	②	③	C
16	④	②	④	③	①	B
17	④	①	③	①	②	B
18	③	②	④	②	③	B
19	④	②	④	②	③	C
20	④	②	③	①	③	B
21	③	①	④	②	③	B
22	④	②	④	③	③	C
23	④	②	④	①	③	C
24	④	①	③	①	③	B
25	④	②	④	①	①	A
26	④	②	③	①	①	B
27	④	①	④	③	③	C
28	②	①	④	②	③	A
30	②	①	④	③	③	A
31	③	①	④	①	②	A
32	④	②	④	③	③	C

表-6 同一決定規則を取り除いた決定表 (CASE-1)

斜面番号	判定要因					危険度
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)	
1	②	①	④	②	③	A
2	④	②	④	②	②	B
3	③	②	④	③	③	C
4	④	②	②	②	③	B
5	③	②	④	①	③	A
6	③	①	④	③	①	A
7	④	②	④	②	③	C
9	③	①	③	①	③	B
12	④	②	③	①	③	B
13	④	②	④	②	①	B
14	③	②	④	①	②	B
16	④	②	④	③	①	B
17	④	①	③	①	②	B
18	③	②	④	②	③	B
21	③	①	④	②	③	B
22	④	②	④	③	③	C
23	④	②	④	①	③	C
24	④	①	③	①	③	B
25	④	②	④	①	①	A
26	④	②	③	①	①	B
27	④	①	④	③	③	C
30	②	①	④	③	③	A
31	③	①	④	①	②	A

この表において、決定属性の条件属性に対する従属性を検討していくと、斜面番号1と28、斜面番号7と11、15、19などが同一の決定規則となっているため、いずれか1つの決定規則を残し、表-6に示すあらたな決定表を得ることができる。

(3) 判定要因に対する項目の取り除き

最後に、判定要因の取り除きによって得られた決定表(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危

険度の診断に影響を与えるものと判断することができない。逆に、矛盾が生じなかった場合、その項目番号は危険度の診断に影響を与えていないものと判断することができる。

例えば、表-6における斜面番号1の判定要因(1)に対する項目番号②を取り除くと、表-7に示すあらたな決定表を得ることができる。この表において、個々の斜面に対する決定規則を検討する。ここで、斜面番号1の判定要因(2)、(8)、(9)、(11)に対する項目番号は、それぞれ①、④、②、③であり、危険度はAと診断されている。これに対して、斜面番号21の判定要因(2)、(8)、(9)、(11)に対する項目番号は、斜面番号1とすべて同じであるにもかかわらず、危険度はBと診断されている。すなわち、危険度の欄に"*"を付した斜面番号1と21の決定規則に矛盾が生じたことになる。したがって、本論文で使用した専門家の診断事例における斜面番号1に対する判定要因(1)の項目番号②は、危険度の診断に影響を与える必要な項目であり、取り除

表-7 斜面番号1の判定要因(1)に対する項目番号②を取り除いた決定表 (CASE-1)

斜面番号	判定要因					危険度
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)	
1	①	④	②	③		A *
2	④	②	④	②	②	B
3	③	②	④	③	③	C
4	④	②	②	②	③	B
5	③	②	④	①	③	A
6	③	①	④	③	①	A
7	④	②	④	②	③	C
9	③	①	③	①	③	B
12	④	②	③	①	③	B
13	④	②	④	②	①	B
14	③	②	④	①	②	B
16	④	②	④	③	①	B
17	④	①	③	①	②	B
18	③	②	④	②	③	B
21	③	①	④	②	③	B *
22	④	②	④	③	③	C
23	④	②	④	①	③	C
24	④	①	③	①	③	B
25	④	②	④	①	①	A
26	④	②	③	①	①	B
27	④	①	④	③	③	C
30	②	①	④	③	③	A
31	③	①	④	①	②	A

表-8 項目を取り除いた決定表 (CASE-1)

斜面番号	判定要因					危険度
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)	
1	②					A
2				②	②	B
3		②		③	③	C
4			②			B
5	③		④	①	③	A
6		①			①	A
7	④		④		③	C
9			③			B
12			③			B
13				②	①	B
14		②			②	B
16		②		③	①	B
17			③			B
18	③			②		B
21	③			②		B
22		②		③	③	C
23	④		④		③	C
24			③			B
25			④	①	①	A
26			③			B
27	④			③	③	C
30	②					A
31		①	④		②	A

表-9 極小決定アルゴリズム (CASE-1)

斜面番号	判定要因					危険度
	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)	
1	②					A
2				②	②	B
3		②		③	③	C
4			②			B
5	③		④	①	③	A
6		①			①	A
7	④		④		③	C
9			③			B
13				②	①	B
14		②			②	B
16		②		③	①	B
18	③			②		B
25			④	①	①	A
27	④			③	③	C
31		①	④		②	A

くことができないと判断することができる。

以上のように、項目番号を1つ1つを取り除き矛盾の有無を検討することで、表-8に示すあらたな決定表を得ることができる。この表における網掛け部の項目番号は取り除いても矛盾が生じなかったことを表す。また、表-8の中で、斜面番号1と30、斜面番号3と22などが同一の決定規則となっているため、いずれか1つの決定規則を残し、表-9に示すあらたな決定表を得ることができる。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、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。

ここで、表-9に示す極小決定アルゴリズムは、表-2に示す専門家が行った危険度の診断事例と同等の診断が可能な決定表となっている。例えば、表-9に示す斜面番号1の決定規則は、判定要因(1)に対する項目番号が②のときは危険度がAであることを示している。これに対して、表-2の中で判定要因(1)に対する項目番号が②となっている斜面は1、28、29、および30の4斜面であり、これらはいずれも危険度がAと診断されている。すなわち、このことは診断の対象となっている斜面の近くに崩壊地が多くある場合は、この斜面も崩壊の可能性が高く、危険度はAと診断されているこ

とを表している。

表-4における、CASE-2からCASE-9までの判定要因の組み合わせに対しても、CASE-1と同様に極小決定アルゴリズムを生成することができる。

表-10 極小決定アルゴリズムのルールによる記述例 (CASE-1)

斜面番号	ルール番号	ルール	
1	1	IF (1)=②	THEN 危険度=A
2	2	IF (9)=② and (11)=②	THEN 危険度=B
3	3	IF (2)=② and (9)=③ and (11)=③	THEN 危険度=C
4	4	IF (8)=②	THEN 危険度=B
5	5	IF (1)=③ and (8)=④ and (9)=① and (11)=③	THEN 危険度=A
6	6	IF (2)=① and (11)=①	THEN 危険度=A
7	7	IF (1)=④ and (8)=④ and (11)=③	THEN 危険度=C
9	8	IF (8)=③	THEN 危険度=B
13	9	IF (9)=② and (11)=①	THEN 危険度=B
14	10	IF (2)=② and (11)=②	THEN 危険度=B
16	11	IF (2)=② and (9)=③ and (11)=①	THEN 危険度=B
18	12	IF (1)=③ and (9)=②	THEN 危険度=B
25	13	IF (8)=④ and (9)=① and (11)=①	THEN 危険度=A
27	14	IF (1)=④ and (9)=③ and (11)=③	THEN 危険度=C
31	15	IF (2)=① and (8)=④ and (11)=②	THEN 危険度=A

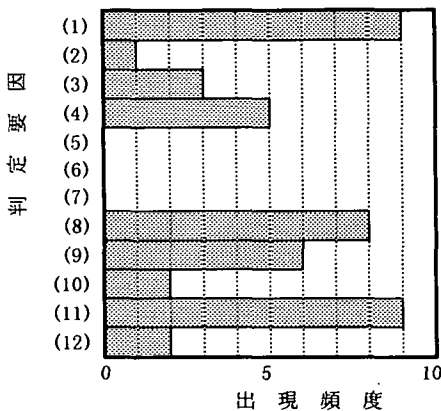


図-2 各判定要因の出現頻度

5. 極小決定アルゴリズムの評価

図-2は、表-4に示す極小決定アルゴリズムに必要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(1)は、CASE-1からCASE-9までのすべての極小決定アルゴリズムにおいて必要とされ、出現頻度は9となる。また、判定要因(2)は、CASE-1の極小決定アルゴリズムにおいてのみ必要とされ、出現頻度は1となる。図-2において、出現頻度の多い順に判定要因を挙げると、「(1)崩壊地の有無」、「(11)湧水の状況」、「(8)斜面上沢状窪みの有無」、「(9)斜面上部地形」、「(4)風化、変質の激しい岩の有無」の順となる。

判定要因(1)については、崩壊履歴に関する判断項目である。極めて近くに位置する斜面は、極端な地質構造の変化などが無い限り、地質や土質などの特徴が類似しているものと考えられる。したがって、

近くに崩壊地が存在すれば、ほとんどの場合、診断の対象となっている斜面についても崩壊の危険度が高いと判断することができる。また、等高線間隔の微小な変化が続く箇所、あるいは植生が周囲と一部分だけ異なる箇所などが、崩壊履歴を判断するためのポイントとしてもあげられている¹⁷⁾。以上のことより、崩壊履歴に関する判定要因(1)は、斜面の崩壊危険度を診断する上で重要な要因の1つであると考えられる。

判定要因(11)については、湧水に関する判断項目である。集中豪雨の際に斜面崩壊が多発することを考えても、降雨や排水などによる水は斜面崩壊を引き起こす重要な誘因である。また、判定要因(8)、(9)、(4)については、いずれも斜面上部に集水地形が存在しているか否かを判断する項目が含まれている。降雨や排水などによる水を斜面上部に集めてくるような地形も、斜面崩壊を引き起こす要因として従来から着目されてきたものである¹⁷⁾。以上のことより、水の通り道に関する判定要因(11)、(8)、(9)、および(4)は、斜面崩壊の危険度を診断する際の重要な要因の1つであると考えられる。

6. ルールの誘導

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、表-9に示すCASE-1の極小決定アルゴリズムは、表-10に示すような15のルールで記述することができる。ルール番号1、2のルールは、それぞれ斜面番号1、2の決定規則をルールで記述したものである。同様に、ルール番号15のルールは斜面番号31の決定規則を記述したものである。

表-11 ルール数と評価項目数

ケース	ルール数	評価項目数
CASE-1	15	35
CASE-2	12	26
CASE-3	16	37
CASE-4	15	32
CASE-5	15	32
CASE-6	15	35
CASE-7	15	35
CASE-8	18	42
CASE-9	17	39

例えば、表-9における斜面番号1の決定規則は、条件属性である判定要因(1)に対する該当する項目が②であれば、決定属性である危険度が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 (1)=② THEN 危険度=A

となる。また、斜面番号2の決定規則は、判定要因(9)に対する該当する項目が②、判定要因(11)に対する該当する項目が②という2つの条件を同時に満足したとき、決定属性である危険度がB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、条件部はand結合で表現することができ、

IF (9)=② and (11)=② THEN 危険度=B

となる。

このようにして得られたルールをもとに構築したESを実行し、結論部である危険度を決定するためには、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。すなわち、ルール番号1のルールにおいては、「(1)=②」という評価項目をもつ条件部を評価して、結論部に記述されている危険度が決定される。また、ルール番号2のルールにおいては、「(9)=②」と「(11)=②」の2つの評価項目をもつ条件部を評価する必要がある。ここで、表-10に示す15のルールに記述された条件部の評価項目の総数は35となる。

表-11は、CASE-1からCASE-9の9通りの判定要因の組み合わせについて、極小決定アルゴリズムを生成して、各ケースにおけるルールおよび評価項目の総数をまとめたものである。

ESを構築する際、危険度の診断法が変更されたり、新たな観測データが入手可能となったときなどに生じる知識の更新を考慮すると、ルール数は少なくなるよう記述すべきである。また、評価項目数も、推論にかかる時間などを考慮すると少なくなるよう記述すべきである。したがって、表-11の中で最もルール数と評価項目数が少なくなっているCASE-2の極小決定アルゴリズムからルールを誘導し、ESを構築することによって、知識更新の効率化や推論時間の短縮化が実現可能となる。

7. あとがき

ラフ集合の基本概念についてまとめ、その適用方法について述べた。ラフ集合の基本的な考え方にに基づき、専門家が行った道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断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型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得ら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型知識を誘導する方法についても提案した。

実際の事例にラフ集合の考え方を適用して、明らかになったことを以下に記す。

- 専門家が斜面の崩壊危険度を診断した事例から、実際に極小決定アルゴリズムを生成し、危険度の診断に影響を与えている判定要因を見つけ出すことができた。これらの判定要因は、従来から重要視されてきた湧水や斜面上部の集水地形、および崩壊履歴を評価するための要因である。
- 極小決定アルゴリズムにおいて必要とされた判定要因は、いずれも従来から重要視されてきたものである。したがって、ある技術者が診断した事例から極小決定アルゴリズムを生成することによって、その技術者が特に重要視した判定要因を見つけ出すことができる。
- 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、使用した危険度の診断事例に対して、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。
- ラフ集合は、結論となる危険度の集合が、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、既存の診断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、実際の事例に対してラフ集合の考え方を適用して、残された課題を以下に記す。

- 極小決定アルゴリズムの生成において、判定要因に対する項目は最初から1つ1つ順番に取り除き、矛盾の有無を評価しているが、取り除くべき項目についても、組み合わせを考慮できる遺伝的アルゴリズムなどを用いた別の方法を検討する必要がある。
- 組み合わせの問題はデータが増えれば増えるほど検討に時間を要するため、データ数を限定してラフ集合の適用可能性を検討した。今後、事例の充実をはかり、データ数が多くなった場合の適用可能性について検討する必要がある。
- 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、危険度の診断に影響を与えると考えられる判定要因を抽出することができた。しかし、これらの判定要因以外の要因についても、他の要因との因果関係により危険度の診断に影響を与えていることが考えられる。今後、このような影響の度合い(重み)が決定できるような方法へと発展させていく必要がある。

参考文献

- 1) 施工技術編集部：最近の集中豪雨集計，施工技術，第5巻，第11号，pp.115-128，1972.
- 2) 武居有恒，小橋澄治，中山政一，今村遼平，池谷浩，平野昌繁，古谷尊彦，奥西一夫：地すべり・崩壊・土石流—予測と対策，鹿島出版会，pp263-320，1993.
- 3) 石川芳治，古閑潤一，佐々木康，三木博史，吉松弘行：土は襲う—地盤災害—，地盤工学会，pp.59-70，1995.
- 4) 例えば，鈴木雅一，福寫義宏，武居有恒，小橋澄治：土砂災害の危険雨量，新砂防，Vol.31/No.3，pp.1-7，1979.
- 5) 例えば，小橋澄治：斜面崩壊危険度分類の問題点，地すべり，Vol.10/No.3，pp.8-14，1974.
- 6) 例えば，沖村孝，市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，No.358/III-3，pp.69-75，1985.
- 7) 建設省河川局砂防部監修：がけ崩れ対策の手引き—急傾斜地崩壊対策事業の実務—，全国地すべりがけ崩れ対策協議会，pp.84-109，1991.
- 8) 林野庁：山地災害危険地区調査要領，pp.5-19，1982.
- 9) 高速道路調査会：地すべり及び斜面崩壊の防止対策の調査手法に関する研究，pp.117-131，1977.
- 10) 沖村孝，広兼道幸，三上市藏，西垣誠，岡田純治：ファジィエキスパートシステムによる斜面危険度診断，講習会テキスト「土木工学へのエキスパートシステムの適用と可能性」，pp.77-82，1992.
- 11) 西邦正，古川浩平，中川浩二：ファジィ理論を用いたのり面の崩壊要因および崩壊可能性の評価について，土木学会論文集，No.445/III-18，土木学会，pp.109-118，1992.
- 12) 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，pp.1-7，1987.
- 13) Pawlak, Z. : *Rough Sets—Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Acad. Pub., 229pp., 1991.
- 14) Ziarko, P. : *Rough Sets, Fuzzy Sets and Knowledge Discovery*, Springer-Verlag, 476pp., 1994.
- 15) Pawlak, Z. : *Rough Sets, International Journal of Computer and Information Science*, Vol.11, pp.341-356, 1982.
- 16) 松村英之：集合論入門，朝倉書店，pp.34-44，1966.
- 17) 奥園誠之：斜面防災100のポイント，鹿島出版会，172pp.，1986.

(1997.4.14 受付)

ROUGH SET BASED KNOWLEDGE ACQUISITION METHOD FROM DIAGNOSIS DATA OF SLOPE-FAILURE DANGER LEVEL

Michiyuki HIROKANE, Hitoshi FURUTA, Shinji NAKAI and Yukihiro MIKUMO

In this paper, a fundamental general idea of rough set is described, which has attracted attention as a basic method to treat the knowledge that can not be distinguished in observation data, and the possibility of applying the rough set is discussed in acquisition of experienced knowledge from observation data.

A minimum decision algorithm is developed to derive useful production rules from a set of observation data. The applicability and efficiency of the algorithm is demonstrated by using an example of slope-failure diagnosis. Using the real data, it is confirmed that the method developed is useful for the acquisition of expertise, which is very important and inevitable to build a practical expert system.