

武蔵工業大学 正会員 吉川 弘道
武蔵工業大学 小泉 修
武蔵工業大学 正会員 小玉 克己

1. はじめに

土木工学の分野では構造物の被害査定や被害診断など、複雑で明確な記述が困難な場合が多い、それを正しく判定するには経験を積んだ少数の専門家によって行われるが、その専門知識をコンピュータ化し、専門家のもつ知識の効率化を目的としたものがエキスパートシステムである。エキスパートシステムには基本的に知識ベースと推論機構から構成され、多くの分野で研究が進められている。

本研究は、ひびわれ診断エキスパートシステムの開発を行うために、推論機構に着目し、その推論方法に Dempster & Shafer の確率理論（DSの理論 以下同じ）を応用して、その実用化を目指すものである。

2. あいまい推論と逆問題

ひびわれの症状 X_i と、ひびわれの発生推定原因 Y_j は あいまいな関係 である。このあいまいな関係はマトリックス R_{ij} で次式のように表現され、「原因 Y_j が与えられたとき、症状 X_i 生じる」と解釈する。

$$X_i = R_{ij} * Y_j \quad (1)$$

つまり、マトリックス R_{ij} が専門家のもっている知識に相当するものである。

本システムは、症状 X_i が生じたときの原因 Y_j を推定するものであり、これをあいまい推論の理論では、逆問題として知られている。DSの理論もこの逆問題の解法の1つである。

表1 ひびわれの症状 X と 推定原因 Y の デシジョンテーブル

	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{31}	X_{32}
Y_1	○	○				○	○	○	○	○	○
Y_2	○	○					○	○	○	○	○
Y_3		○			○			○	○		
Y_4			○	○				○			
Y_5		○						○	○		

$[Y_1]$ 乾燥収縮によるひびわれ
 $[Y_2]$ 温度応力（水和熱）によるひびわれ
 $[Y_3]$ 凍結融解によるひびわれ
 $[Y_4]$ 鉄筋の発錆によるひびわれ
 $[Y_5]$ 外的な荷重（曲げ、剪断、引張り）

$[X_{11}]$ 規則性（有）、部材長手直行方向（一本のみ）
 $[X_{12}]$ 規則性（有）、部材長手直行方向（一方向多数）
 $[X_{13}]$ 規則性（有）、部材長手直行方向（二方向多数）
 $[X_{14}]$ 規則性（有）、配筋方向
 $[X_{15}]$ 規則性（無）、網状・亀甲状

$[X_{21}]$ 発生時期（数時間～1日）
 $[X_{22}]$ 発生時期（数日）
 $[X_{23}]$ 発生時期（数十日以上～数カ月）
 $[X_{24}]$ 発生時期（一年以上）

$[X_{31}]$ コンクリート打ち込み温度（高）
 $[X_{32}]$ コンクリート打ち込み温度（中）

表1は X_i 、 Y_j の相関関係を示したマトリックス R_{ij} であり、この表の見方は、たとえば、「もし、構造物に規則性のある、部材長手直行方向に1本のみのひびわれが発生していれば（ X_{11} ）、ひびわれの原因として、乾燥収縮によるひびわれ（ Y_1 ）、温度応力によるひびわれ（ Y_2 ）、の両方あるいはいずれかであると推定される」となる。

3. Dempster & Shafer の確率理論 [1] の適用

DSの理論は Bayes 確率に適さない主観に関わる不確実性を扱うために、上界および下界確率という新しい考え方を基本確率を通じて定義した。図1は表1のひびわれの発生時期（ X_{2j} ）と、ひびわれ発生推定原因の関係をDSの理論に基づいて図化したものである。DSの理論によれば、基本確率 $m(A_j)$ は、部分集合 X_{2j} に閉じこめられているが、 X_{2j} 内の各点に自由に動ける半可動確率質量としてイメージすることができる。図1の3段目の基本確率 $m(A_2)$ を0.6の質量と考えると、この質量は Y_1 、 Y_2 のいずれにも移動してとどまることが

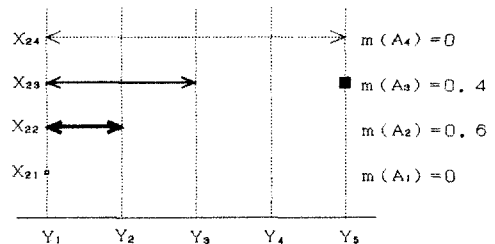


図1 Dempster & Shafer の確率論における基本確率の例

でき、また、0.4と0.2のように分散してとどまることもできる。ここで基本確率 $m(A_2) = 0.6$, $m(A_3) = 0.4$ は、構造物のひびわれ発生時期が数日から数ヶ月の間であることを示している。

推定原因を Y_1 から Y_5 に分類し、その有限な全集合を $A_0 = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\}$, $A_J (J=1, 2, \dots)$ をその部分集合とすると、基本確率 $m(A_J) (J=0, 1, \dots)$ は $[0, 1]$ の値をとり、次のような制約条件のもとに与えられなくてはならない。

$$m(\phi) = 0 \quad (\phi: \text{空集合}) \quad , \quad \sum_{A_J \subseteq A_0} m(A_J) = 1 \quad (2)$$

下界確率 P_* は基本確率を用いて、次のように定義される

$$P_*(A_J) = \sum_{A_k \subseteq A_J} m(A_k) \quad (3)$$

すなわち、部分集合 A_J 内に閉じこめられた基本確率の総和である。一方上界確率 P^* は

$$P^*(A_J) = 1 - \sum_{A_k \subseteq \bar{A}_J} m(\bar{A}_k) = 1 - \sum_{A_k \subseteq \bar{A}_J} m(A_k) \quad (4)$$

で定義され、少しでも A_J 内にはいる可能性のある基本確率の総和を意味する。図1について、たとえば部分集合 X_{22} の下界確率は $P_*(A_2) = m(A_2) + m(A_4) = 0.6$, 上界確率は $P^*(A_2) = 1$ となる。この数字は、この状況ではひびわれの原因が $\{Y_1, Y_2\}$ である確率は最低でも 0.6 であり場合によっては 1.0 まで上昇する可能性があることを示している。0.6 から 1.0 の間のいずれであるかは情報の不完全さ、あるいは無知により判断されず、Evidential Reasoning の一例である。

次に、重要な法則として Dempster の結合則がある。この法則には、同じ対象集合 A_0 における異なる主観 X_{11}, X_{23} により新たな基本確率を求めるもので、次式によって表される。

$$m(X_k) = \frac{\sum_{X_{11} \cap X_{23} = X_k} m_1(X_{11}) m(X_{23})}{1 - \sum_{X_{11} \cap X_{23} = \phi} m_1(X_{11}) m(X_{23})} \quad (\text{但し } X_k \neq \phi) \quad (5)$$

4. 推論事例とその検討

表1の各要素に対して、実際に生じたひびわれ発生事例[2]をもとにして、発生原因の推論を行った。まず、現場のひびわれ発生状況から基本確率として、 $m(X_{12}) = 0.6$, $m(X_{14}) = 0.4$, $m(X_{22}) = 0.6$, $m(X_{23}) = 0.4$, $m(X_{31}) = 0.8$, $m(X_{32}) = 0.2$ を得ることができた。

次に、Dempster の結合則により3つのブロックの基本確率を順次統合した。図2は表1の異なる2つのブロック X_{11}, X_{23} の部分集合の関係を示したものである。

たとえば、 $\{Y_4\}$ は $X_{13} \cap X_{23}, X_{13} \cap X_{24}, X_{14} \cap X_{23}, X_{14} \cap X_{24}$ の4つから構成されていることがわかる。

これを Dempster の結合則により統合すると $m(\{Y_4\})$ は新たに 0.21 という基本確率を得ることになる。最終的に基本確率は、 $m(\{Y_1\}) = 0.41$, $m(\{Y_1, Y_2\}) = 0.59$ に統合された。そして、このとき上界確率は両方とも 1.0 であり、下界確率は $m(\{Y_1\}) = 0.41$, $m(\{Y_1, Y_2\}) = 1.0$ という算定結果が得られた。これは、乾燥収縮と温度応力によるひびわれの両方またはどちらかであるという推論結果を示している。専門家による実地検証によれば、「乾燥収縮と温度応力が複合して生じたひびわれである」という結論が明示されており、本システムの推論結果と一致したことになる。今後の課題として、デシジョンテーブルへのあいまいさを含んだ多値的扱いを挙げることができる。

参考文献

- [1] 石塚満: "Dempster & Shafer の確率理論", 電子通信学会誌, 66, 9, pp.900-903(1983)
- [2] 日本コンクリート工学協会: "コンクリートのひびわれ診断・補修指針" pp.124-128

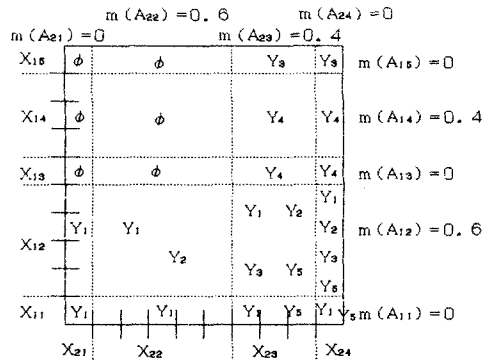


図2 二つの主観にもとづく部分集合の関係