

IV-20 地域環境診断におけるエキスパートシステムの適用と課題

北海道大学大学院環境科学研究科 正 員 加賀屋 誠 一

1. はじめに

最近、都市での生活をみると高度なシステム化が起こっているといってもよい。その最も重要な役割をはたすのが情報であり、情報によって連鎖が巧みに形成されている社会が高度情報化社会であるといえる。例えば、最も身近な例としては、電話がほとんどの家庭に設置され、わざわざ訪問しなくても、かなりの情報の交換が可能となっている。また、さらにファクシミリや、パソコン通信等の利用により、聴覚のみの通信媒体が、視覚も加わって、伝達が正確にまた、多様に行われるようになってきている。そして高度情報化が社会に与える影響は、今後益々大きくなると考えられる。大規模なデータベースシステムの構築と利用、大量データの通信電送技術などが、その典型例であるが、情報の質的処理技術においても様々な研究開発がおこなわれつつある。それらの主たる目的は情報の知識化、質の悪い情報の有用化、人間の思考の推論システムの構築などである。これらの多くは、ファイゲンバウムによって1977年提唱された、知識工学(knowledge engineering)として、その後、論理型システムの開発や、第5世代コンピュータの考え方が急速に普及しつつある。

ここでは、主として、土木計画の分野で地域環境評価のため、どのような点でそれらを活用でき、また、現在利用にあたって問題点がどのようなところにあるかについて考えていくものとする。^{1)・2)}

2. エキスパートシステムと地域環境診断の方法

(1)不確実性を伴う推論方法

上述のように、近年、知識工学、エキスパートシステムなどの急速な普及がみられるが、それらのシステムの発端となったのは、1960年代に開発された、DENDRAL、MYCIN等である。これらのシステムは、知識ベースと推論機構を別々に持ち、ユーザインタフェースによって対話型に推論結果を出力するシステムである。複雑な問題の場合、それらに関連する知

識を多数の小規模知識集合、メタ知識として表し、また一般にプロダクションシステムによって推論システムを表すのが特徴である。さらに、これらの知識システムの信頼性、確実性を評価する方法として、確実性測度を導入している。例えば、EMYCINのCF値、主観的Bayesの方法の尤度比、ファジィ論理での真理値等は、その考え方に基づいたものである。³⁾ 確実性測度は、主として主観に関わる不確実性を取り扱う必要性から発生してきたものであり、その意味では、独立性を課せなくても推論に矛盾を生じないファジィ論理は、効果的で有用性が高い考え方といえる。

ファジィ論理に基づくファジィ推論は、論理を構成する命題も因果律もまた真理値もすべてあいまいの場合の推論であり、推論結果も2値論理のように明確に示されない場合が多い。しかしながら、命題が多少違っても推論は弾力的であるために、複雑な問題で命題の再現性が難しい場合、むしろ人間の思考過程を忠実に再現できる特徴を持っている。ここでは、ファジィ推論に基づくモデル構築方法について実例に基づいて検討していくものとする。なお、実例として、地域水害危険度評価のためのエキスパートシステムをとりあげる。

(2)ファジィ推論のための方法

a)ファジィ関係を用いる方法

この方法は、ファジィ関係を用い、入力との合成によって出力を表す方法で、既に、故障診断や医療診断システムなどに適用が試みられている。例えば、地域水害危険度評価について考えると、与えられた災害情報を、ここでは、原因に関する情報の集合C、被害に関する集合D、および、各災害が生じる地区Pに分け、各々の集合を、災害関係システムRによって関係づけることとする。ここでは、これらの3つの集合から得られるステージを記述し、それらの関係を決定する問題についてファジィ関係を用いて考える。すなわち、原因及び被害は、今まで得られた記録、地域特性によって観測され表されと考え、災害関係システムは、それらの原因と被害から求め

られる推測値と、得られた経験、記録によって構築、検証される。⁴⁾一連の推論システム算出手順を示すと、図1のようになる。

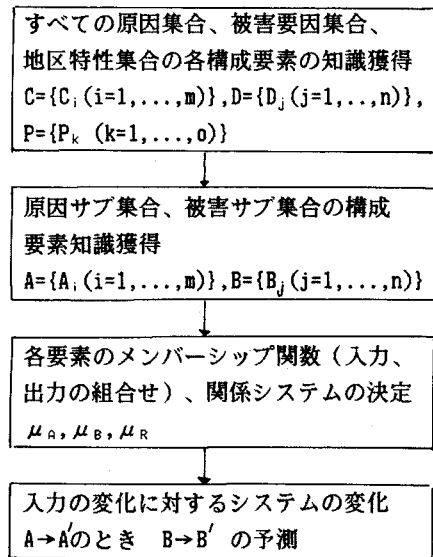


図1 ファジィ関係による推論システムモデル

b)被害構造の推論システム

災害発生、地域特性によって得られた原因に関する集合Cのファジィサブ集合をA、また被害に関する集合Dのファジィサブ集合をB、さらに、CからDへのファジィ関係をRとすると、これらの関係は、 $B = R \circ A$ というファジィmax-min合成で表される。メンバーシップ関数をそれぞれ μ_A 、 μ_B 、 μ_R で表すと、関係は(1)のように表される。^{5), 6)}

$$\mu_B(d) = \max_{c \in C} [\mu_A(c) \wedge \mu_R(c, d)], \quad (1)$$

ここで、(1)は、ある地区のある状態が、原因のファジィサブ集合Aによって表されるならば、そのとき、集合Cから集合Dへのファジィ関係システムRを通してファジィサブ集合Bによって被害規模が決定されると解釈することができる。ここで、ファジィ関係Rは、災害記録及び地域防災関係者の情報を整理することによって決定される。

c)各地区の災害記録からの分析

関係システムRは、CからDへのファジィ関係を表しているが、いま、過去の災害記録をもつ各地区は、集合Pの要素である。各地区に対して、対応する集

合Aを考え、またPからDへのファジィ関係システムをQとし、PからDへのファジィ関係システムをTとすると、TとQの関係は、 $T = R \circ Q$ となる。これを、メンバーシップ関数で表すと、(2)のようになる。

$$\mu_T(p, d) = \max_{c \in C} [\mu_Q(p, c) \wedge \mu_R(c, d)], \quad (2)$$

$c \in C \quad (p, d) \in P \times D$

もし、pを単1要素であるとする、(2)は、(1)となり、実際には、前述したように、 $T = R \circ Q$ は、 $B_p = R \circ A_p$ とみなされる。(pは、集合Pの要素である)したがって次の(3)、(4)が得られる。

$$\mu_{A_p}(p) = \mu_Q(p, c), \quad (3)$$

$$\mu_{B_p}(p) = \mu_T(p, d). \quad (4)$$

ここで、各地区に着目して、QとTの関係の適合性について計算する方法を考えてみる。Pで観察されたある原因要素cによって、ファジィサブ集合Pを得るとすると、(5)となる。また、Tについても(6)のように計算できる。

$$\mu_{P_c}(p) = \mu_Q(p, c), \quad (5)$$

$$\mu_{P_d}(p) = \mu_T(p, c). \quad (6)$$

TとQの知識情報からRの存在を与える必要条件は、ある災害記録に対して(7)が成立することである。

$$\mu_T(p, d) \leq \max_{c \in C} \mu_Q(p, c), \quad \forall d. \quad (7)$$

この式は、(2)から容易に導かれるが、計算されたRを用いることによって、原因から被害を推論できる。また、もし結果が満足したものでなければ、新しい方法を利用して関係システムRを修正する必要がある。

(3) ファジィ関係システムの決定方法

a)ファジィ推論の含意公式

ファジィ条件文をファジィ関係に変換する方法としてZadeh、Mamdani、Yager、Sanchezらの方法があるが、Mamdaniは、 $C \rightarrow D$ として直積 $C \times D$ を採用している。すなわち、関係システムを R_m とすると、

$$R_m = \mu_{C_i} \wedge \mu_{D_j} \quad \forall i, j. \quad (8)$$

一方、Sanchezは、次の演算 α を考えた。

$$a \circ b = \begin{cases} a & a \leq b \\ b & a > b \end{cases}. \quad (9)$$

この演算を利用して、(10)を計算する。

$$R_g = \mu_{C_i} (\alpha) \mu_{D_j} \quad \forall i, j. \quad (10)$$

これは、CとDが与えられたときに、 $C \circ R = D$ を満たすRのうちで一番大きいものを探ることを表し

ている。

b) 災害情報のファジィ数値情報化

災害情報—特に、水害に関する情報は、その被害構造の関連樹木図にしたがって整理される。この場合、通常定量的情報と、言語的情報の両方で得られるが、ファジィ推論を行う場合、数値的情報に変換を行っておく必要がある。変換の方法については、言語的情報で得られたメンバーシップ関数をいくつかのレベルと考え、それに基づいて[0,1]の範囲で区間値を決定し(α -cuts)、その値から演算に必要な代表値を選択する。

(4) 確実性測度の算定方法

ここで、もう一度プロダクションルールにかえりこれらのルールの確実性の評価について考えることとする。災害の構造に関わる推論ネットワークは、次のようなルールの組合せに基づいて形成される。⁷⁾

IF (前提条件) THEN (結果) WITH (確実性測度)

ここでの確実性は、2つの異なった概念によって考えることができる。1つは、結果に対する条件が発生する確からしさであり、他の1つは、条件があったとき、結果が伴うかどうかの確からしさである。ここでは、前者をCF1、後者をCF2とし、得られた知識情報を用いて、(11)、(12)のように定義した。

$$\mu_{CF1} = \{F(C_i \cap D_j) / F(D_j)\} = F(C_i / D_j), \quad (11)$$

$$\mu_{CF2} = \{F(C_i \cap D_j) / F(C_i)\} = F(D_j / C_i), \quad (12)$$

ここで、 $F(C_i \cap D_j)$ は、原因と被害が同時に発生する頻度、 $F(D_j)$ は、被害の発生する頻度、 $F(C_i)$ は、原因の発生する頻度、 $F(C_i / D_j)$ は、被害が与えられたときの原因の発生する頻度、さらに、 $F(D_j / C_i)$ は、原因が与えられたときの被害が発生する頻度である。

これらの確実性測度によって作成された関係システムRfは、[下限値、上限値]の区間値で表される。

4. 危険度診断システムの構築

(1) 対象地域とその災害特性

対象地域として、登別市を選定した。登別市は、山岳地帯、台地地帯、沖積平野を持ち、居住地域は、その大半を平野部に集中している。市の中心地区幌別地区(地区A)、農業を主体とする札内地区(地区B)、温泉地の登別温泉地区(地区C)、漁港のある登別地区(地区D)、室蘭に隣接した鷺別地区(地区

E)に分けられる。

また、対象地域は、オロフレ山系の東斜面と海岸に接しており、北海道での有数の降水量の多い地域であり、また市内を流れる中小河川は、感潮河川という条件を持っている。さらに、その河川改修の進捗率は高くなく、このような条件から、しばしば低平地を中心に浸水被害、また、丘陵地および、山岳斜面地域は、斜面崩壊、地すべりなどの被害が発生している。今回は、特に、このような複合的な水害の発生を対象として考え、地区Aと、地区Bの災害構造からの本方法の適用を試みた。

表1 原因・被害要因の抽出とその変数名

	要因	変数名	要因	変数名
素因 的 原因	総雨量	A11	住宅被害	B1
	時間最大雨量	A12	工業被害	B2
	地質構造	A13	商業被害	B3
	平均傾斜度	A14		
	森林植生状態	A15		
	感潮河川の影響	A16		
	地形標高	A17		
	治水進捗度	A18		
誘因 的 原因	治山進捗度	A19	注) 対象となる被害は、現実として、農業、道路、河道などの被害も計測すべきであるが、ここでは上記の3種に限定した。	
	被覆度	A20		
	地すべり	AD1		
	土石流	AD2		
	浸水	AD3		
	破堤、溢水	AD4		
	内水	AD5		

(2) 原因と被害の構造と要因の決定

ここでは、異常降雨による地域の複合的な水害構造を把握するため、その被害構造要因について抽出、整理することとした。その結果得られた水害発生構造は、ファジィ推論モデルに導入される要因として抽出され、関係システムの入力、出力変数として表すと、表1のようになる。表1は原因とそれに伴う被害要因を示したもので、原因については、災害の直接的な原因となる素因集合と、拡大要因になる誘因集合の2つの階層からなり、被害要因と推論ネットワークを形成する。

これらの要因から得られた変数は、定量的、非定量的

的変数どちらでもよくそれぞれ、災害記録や、専門家の経験情報によって災害に寄与する強さを真理値としてファジィメンバーシップ変数で表し、[0 1]の範囲の数値をとる。

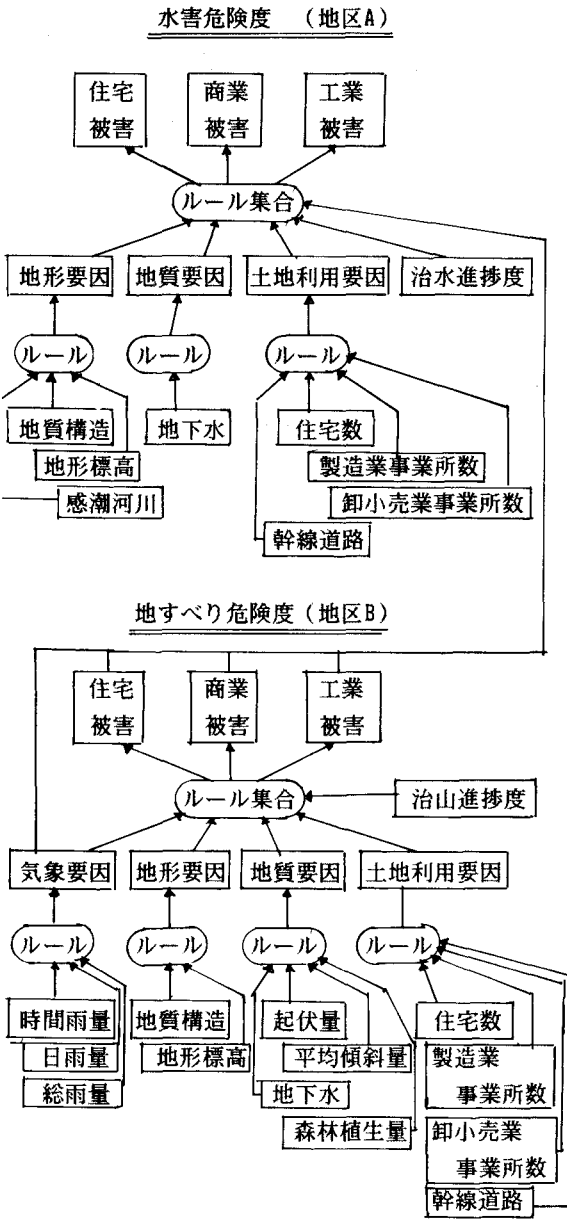


図2 災害危険度診断推論ネットワーク

(3)関係システムの決定

3つの階層を含むファジィ推論ネットワークは、

図2のように表され、各ルール単位で関係マトリクスが作成される。

データソースとしては、過去の災害記録と、地元治水、都市計画担当者の考え方を提示してもらい、それを用いる。なお用いた過去の災害記録は、16ケース、また専門家に対する調査は、50名に対して行った。

図2は、地区Aと地区Bの相互的な関連性を考慮した場合の推論ネットワークである。例えば、地区Aの危険度については、地区Bの水害が影響するようなシステムを考えている。

関係システムは、75個のプロダクションルール（プロトタイプモデル）を持つ構造である。

5. エキスパートシステムの検証と適用例

(1)原因－被害要因の関係システムのルール
 原因と被害要因について、3. で考えた手順によってルールの構築を行った。その結果得られた、ルールの確実性測度をファジィ論理の真理値および確信度（CF値）で表わし、推論システムに導入した。

(2)入力条件設定によるシナリオ分析
 次に、これによって得られた推論ネットワークを用いて、プロトタイプモデルを構築し、いくつかのシナリオによるシミュレーション分析を行った。シナリオのいくつかについて示すと次のようになる。なお、この場合プロトタイプモデルのためのエキスパートシステム作成のツールとしては、PROLOGをベースにした、SHELL-KABAを用いた。そのプログラムの例の1部を図3に示す。その評価のための確信度は、ファジィ論理の論理積の場合と少し異なり、次のような式となる。

$$\begin{aligned}
 CF_{comb}(X,Y) &= X+Y(1-X) & (X>0,Y>0) \\
 &= (X+Y)/(1-\min(X,Y)) & (X<0 \text{ or } Y<0) \\
 &= -CF_{comb}(-X,-Y) & (X<0,Y<0) \quad (17)
 \end{aligned}$$

ここで考えたシナリオは、次の4種類とした。
 シナリオ1・・・1981年8月に発生した異常降雨に伴う水害の例を再現したシナリオである。

シナリオ2・・・地区Aに200-300mmの総降水量、地区Bにも同様に、200-300mmの総降水量、また時間最大降水量は、25mmであり、さらに、日降水量を200mmと設定したとき、どのような診断が行われるか考えてみ

る。

シナリオ3・・・地区Aに100mm程度の総降雨量があった。そのときの最大時間雨量は、10mm、日降水量は80mmであった。他の要素が変化しないときどのような変化があるか。

シナリオ4・・・気象要因がシナリオ3であり、地区Aの土地利用要因が著しく都市化が起こったときどのように変化するか。

先のファジィ推論システムの演算結果と、シミュレーション結果をまとめると、表2に示ようになる。この場合、評価としては、確実性測度で表されているが、前者の場合、真理値評価、また、後者の場合、確信度で評価されている。

これを見ると、相互の数値は、ほぼ対応関係にあるが、全体にCF値が高い値になっていることがわかる。また、シナリオ1の実際の災害との関係もよく再現されていることが明かとなった。さらに、原因は、上の方から影響の強い順に並べてあるが、各シナリオの特徴をよく捉えていることがわかる。

```
%% ----- 仮説 ----- %%  
hypothesis '氾濫住宅被害(下流域)' has  
  type : taxonomy ;  
  super : self ;  
  desc : '氾濫住宅被害が起こる'.  
  
hypothesis '氾濫工業被害(下流域)' has  
  type : taxonomy ;  
  super : self ;  
  desc : '氾濫工業被害が起こる'.
```

```
%% ----- ルール ----- %%  
  
rule 'ルール 1' has  
  control : do_1 ;  
  form :  
    if f('時間雨量','かなり多い',true) &  
       f('日雨量','かなり多い',true) &  
       f('総雨量','かなり多い',true)  
    then h('気象要因がある',80).  
  
rule 'ルール 51' has  
  control : at_last ;  
  form :  
  
  if h('気象要因がある',50,100) &  
     h('地形要因(下流域)がある',60,100) &  
     h('地質要因(下流域)がある',60,100) &  
     h('土地利用要因(下流域)がある',50,100) &  
     h('治水進捗度(下流域)',80,100) &  
     h('感潮河川(下流域)',60,100) &  
     h('地すべり被害(上流域)',80,100)  
  then h('氾濫住宅被害(下流域)',70).
```

```
%% ----- 質問事項 ----- %%  
  
question '時間雨量' has  
  type : single ;  
  prompt : '時間雨量を選んで下さい' ;  
  initial : no ;  
  unchanged : no ;  
  condition : true ;  
  candidate :  
    [ ('かなり多い','50mm以上'),  
      ('やや多い','50mm-20mm'),  
      ('少ない','20mm以下') ].
```

図3 プロトタイプモデルのプログラム内容一例

表2 シミュレーション結果

		シナリオ 1		シナリオ 2		シナリオ 3		シナリオ 4	
		μ 値	CF 値	μ 値	CF 値	μ 値	CF 値	μ 値	CF 値
地	B1	0.9	96	0.8	93	0.5	72	0.8	81
区	B2	0.6	83	0.6	68	0.5	55	0.6	72
A	B3	0.8	89	0.8	78	0.5	68	0.7	85
地	B1	0.8	64	0.7	60	0.5	28	0.6	68
区	B2	0.5	28	-	-	-	-	0.5	28
B	B3	0.5	49	0.5	28	0.5	28	0.6	60
影響を 与える 原因 (強さ の順 に示 す)	土地 (上下)	土地 (上下) 気象 地形上 地質 (上下) 感潮 治水 治山		土地下 地形上		土地上下 地形上			
	気象			土地上		地質上下			
	治水			地質		地形下			
	治山			地形下		感潮			
	地質			感潮		治水			
	(上下)			治水		注) μ は、ファジィ 論理の真理値を表す			

6. まとめと課題

本研究は、地域の水害危険度診断に対する主として、ファジィ推論システムの適用によるエキスパートシステム構築に関する基礎的分析であり、得られた結果は、大きく2つの点にまとめられる。

第1点は、われわれが、地域の情報として量的にも質的にも様々なデータを持ち合わせているが、その中には、かつて一度も活性化されないもの、質的に非常に浅い知識などがあり、そのような情報を知識ベースとして活用化する可能性を展開したことである。また第2点は、水害危険度診断システムのプロトタイプのモデルを提示できたことである。具体的な検討結果については次のように集約される。

①水害危険度診断のためのエキスパートシステムは、いくつかの要因の確実性測度に基づくファジィ値の知識情報と、それらの因果関係の確実性測度によるファジィ値の知識情報に基づいた知識ベースと、推論システム、プロダクションルールによる推論エンジンによって構成される。各々のメンバーシップ値、あるいは、確信度は、経験情報によって獲得され、改善される。なお、エキスパートシステム構築ツールでは、例えば、SHELL-KABAのように、PROLOGなどの論理型言語の導入により、記述的な知識情報によって、シミュレーションができる特徴がある。

②特に、地域環境の中で今回のように、水害など、複合的要因によって、複合的被害発生という問題が起こる場合、しかも、地域診断のための深い意味でのデータが不足している場合、主観的、経験的情報と、ヒューリスティックな推論システム構造を基に、水害危険度を与えることができる。

③ここでの大きな問題は、それらの情報をいかにファジィ推論によって関係づけるかであり、すなわち、要因Aと要因Bの関係 $A \rightarrow B$ を決定することである。それについては、昨年度に報告しているが、ここでは、得られた関係システムによって A' 、 $A \rightarrow B$ が、 B' を導く推論を行う方法を検討している。

④原因、被害の要因について、この診断システムでは、多数の要因の導入が可能であり、また、言語的情報をも組み込むことができる。さらに、それらの付加または削除も比較的容易である。特に、いままで被害額で換算されていた被害ポテンシャルについて必ずしも、その考え方をとる必要がなく、危険度についても、分かりやすいものとなっている。

一方、エキスパートシステム構築の問題点としては、①知識ベース作成上の問題---情報源として、過去の不完全な災害記録と、専門家の主観的情報をよりどころとしており、それらの情報の重みの判断があいまいである。そのため、相互の情報に矛盾が生じる場合、どのように知識ベースの作成を行うべきかを検討する必要がある。

②知識の統合化とヒューリスティックな知識獲得に関わる問題---この場合、新しい発見があるとき、モデルのプロダクションルールの変換や、確信度の変化を自動的に替えることができず、システム全体の改良が必要である。いわば、AIとしての学習による

システムの洗練化が難しい。

③システムの性能とプロダクションルールの量---ここでの推論エンジンは、プロダクションルールをベースとしているが、システムの性能をあげるとすれば、指数的にルールの数が増加する。従って、ルールの階層化や、基準化を考えた方法の確立が必要である。

④動的エキスパートシステム---現在、このシステムでは、動的あるいは、連続的な診断ができない。環境問題、例えば、大気汚染問題や、交通渋滞などの問題では、このような時間関係を導入する必要がある。したがって、入力データの連続変化による診断結果を表すシステムの構築が必要となる。

しかしながら、このように開発途上の多少の問題があるにせよ、意思決定問題の支援システムとして、今後有力な手段になることはまちがいないといえる。

最後に、研究を進めるにあたって、数多くの示唆をいただいた北海道大学山村悦夫教授に謝意を表したい。なお、システムは、計算機としてNEC-PC9801 VXおよび9801E、プログラム言語は、DEC-10相当のPROLOG-KABAを用い、さらにプロトタイプモデルは、SHELL-KABAツールにより、作成している。

7. 参考文献

- 1) 加賀屋誠一；構造化手法とファジィ逆問題に関する基礎的考察、土木学会北海道支部論文報告集、第43号、pp411-416。(1987)
- 2) 中山義光、加賀屋誠一、山村悦夫；FUZZY推論による地域防災診断に関する研究、掲載は、1)に同じ、pp423-428。(1987)
- 3) 例えば、石塚満；不確かな知識の取り扱い、小特集知識工学、計測と制御、VOL.31, NO.9, pp21-28。(1986)
- 4) 例えば、吉野文雄；都市と水害、災害のOR、オペレーションズ・リサーチ、VOL.31, NO.9, pp21-28。(1986)
- 5) 例えばNegoita, C.V.; Expert Systems and Fuzzy Systems, pp95-116。(1983)
- 6) 例えばSanchez, E.; Medical Diagnosis and Composite Fuzzy Relations, Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, pp437-444。(1979)
- 7) 例えば、Hayes-Roth, F. et al., Building Expert Systems, Addison-Wesley, pp61-189。(1983)