

建築物被害査定のエキスパート・システム†

石 塚 満††

土木、構造工学分野における被害査定は少数の経験を積んだ技術者のみが正しく行いうるとされているのが現状である。本論文はとくに強い地震振動を受けた建築物を対象として開発されたコンピュータによる被害査定システム SPERIL を記している。本システムは複雑な判定問題において、専門家の知識の有効利用を可能とするエキスパート・システムの方法論を基礎に開発されている。被害査定問題に含まれる不確実性 (uncertainty) およびあいまい性 (fuzziness) を伴う知識の有効利用を図るため、Dempster & Shafer 理論のファジィ集合への拡張に基づく合理的な推論機構が使用されており、これによって観測された複数個の証拠は統合評価される。目的とする判定問題は部分問題への分割によって階層的に記述されている。推論機構により仮説の確実性測度が順次決定され、階層的ネットワーク内を伝搬する。最終ゴールの仮説の確実性測度が求められ、これによって適切な回答が与えられる。

1. ま え が き

本論文は地震振動を受けた建築物を主対象とする、ルール化された知識に基づく被害査定システムを記しているが、これは日本の実状でなくアメリカの土木・構造工学分野の実状に即して設計されたものであることを最初に明記しておく。

構造物被害査定の役割と技術の現状は Yao によって紹介されている¹⁾。たとえば強い地震振動の後、部分的崩壊が起こったような小数の構造物を同定することは容易であるが、他の多くの構造物の被害程度を正しく把握し、修理の必要性、その方法を正しく判定することは容易ではない。被害査定は経験を積んだ少数の専門家によって行われているのが現状であり、さらにこのような判定法の若手技術者への転移は主として徒弟的な関係によって行われているのが現状である。今日までに構造物被害査定のいくつかの手法が提案され¹⁾、また関連研究として構造物の災害に対する耐性評価に関するいくつかの方法が開発されてきた²⁾⁻⁵⁾。しかし被害査定への合理的かつシステムティックな方法は確立されていない。

Fu と Yao は 1979 年にこの問題はパターン認識の理論によって扱いうることを示唆した⁶⁾。パターン認識⁷⁾では統計的手法、あるいは構文的・構造的手法のいずれによっても、問題となるパターンをある数学モデルによって記述するの必要があり、これには対象パターンに関する統計的な知識が要求される。このよう

うな知識は、本被害査定や医療診断^{8),9)}のように、複雑で明確な記述が困難な問題においては得られないことが多い。また対象となる建築物の条件は多種多様であるので、標準モデルに基づくパターン認識手法の適用には困難な点が多い。したがって、1980 年より被害査定システムは専門家の知識を集積し、推論によって回答を導くエキスパート・システムを枠組として構成されることになった。

システム構築の基礎理論として、不確実性 (uncertainty) とあいまい性 (imprecision or fuzziness) を伴う知識を利用する場合の合理的な推論法が開発された¹⁰⁾⁻¹⁴⁾。ここでは不確実性とあいまい性を伴う知識を含む知識ベースをもつ建築物被害査定のエキスパート・システム SPERIL (Structural PERIL)¹⁵⁾⁻¹⁷⁾の概略を、その推論理論とともに示す。SPERIL は現在第 1 版であり、そのルールは今後より特定した対象に関するより詳細なルールで置き換えられることが期待されているが、この第 1 版は土木・構造工学分野における被害査定問題に対する一つのシステムティックな接近法を実証したものとして評価できよう^{18),19)}。SPERIL は言語 C で書かれ、UNIX の OS 上で動作している。

2. 不確実性を伴う問題の分割

人間の専門家のもつ知識の効率的利用は、人工知能手法の複雑な現実問題の解決への適用を目指すエキスパート・システムの中心課題である。エキスパート・システムの構築に関する研究分野は知識工学と名付けられた²⁰⁾。エキスパート・システムは基本的に i) 知識ベース と ii) 推論機構 から成る。

† An Expert System for Damage Assessment of Existing Structures by MITSURU ISHIZUKA (Institute of Industrial Science, University of Tokyo).

†† 東京大学生産技術研究所

複雑な判定問題においては、関連する知識を多数の小知識の集まりとして表すのが効率的となる。Problem Reduction 法^{21),22)}は問題をいくつかの部分問題へ分割するガイドラインを与える。部分問題はさらに簡単な部分問題へと分割される。したがって、問題は階層的に記述される。問題が達成されるべき最終ゴールをもつように、各部分問題も得られる情報から達成されるべき部分ゴールをもつ。

プロダクション・システム^{23),24)}は、下位の部分ゴールと観察された証拠から、上位の部分ゴールあるいは最終ゴールを推論するのに使われる小知識を表現するのに都合のよい方法を与える。プロダクション・システムによれば、小知識は次の形式のプロダクション・ルールによって書き表される。

Rule IF X
THEN A

ここで IF 節, THEN 節はそれぞれ前提(または条件), 動作(または結論)と呼ばれる。ルールの基本機能は簡単であり、もし前提が満たされれば、部分ゴールまたは最終ゴール状態の更新動作を起こすことである。

現実社会の判定問題では、状況は真偽の2値で表されるように明確でないことが多い。そこには2種の不確実性が存在する。第一は観察されるデータまたは証拠に付随する不確実さであり、第二は表明された知識に付随する不確実さである。ゆえにこの不確実さを効果的に扱うための推論機構が必要となる。

不確実さを伴う判定問題においては、部分問題間の AND/OR 関係に加えて、文献 12) で COMB と表されている結合(combination)関係も重要となる。結合関係とはゴールが二つ以上の証拠によって独立に支持されるような部分問題への分割を指す。これによって、問題はたとえば図 1 のように AND/OR/COMB グラフによって記述できることになる。

AND/OR 関係に対する推論は容易であり、それぞれある確実性測度上で min, max 演算を採用できる。したがって、COMB 関係に対する合理的な推論法を、確実性測度の定義とともに定めることが必要となる。合理的な推論法とは、少なくとも知識が正しい限りは常に正しい回答を導き出すような方法を意味する。

あるゴール状態あるいは仮説 A に対して二つの独立な証拠状態 X と Y が観察されている、あるいは先行の推論によって得られているという図 2 の基本状況を考えよう。ここで知識ベースに次のルールをもってい

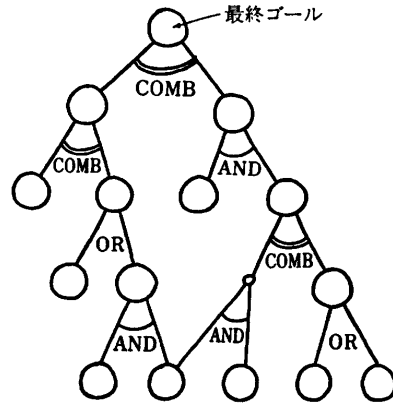


図 1 不確実性を伴う問題に対する AND/OR/COMB グラフ
Fig. 1 AND/OR/COMB graph for a problem with uncertainty.

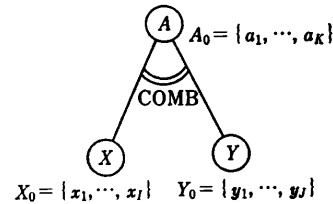


図 2 異なる証拠の結合による推論
Fig. 2 Inference from the combination of two different evidences.

るとする。

Rule 1 IF : X₁
THEN: A₁₁ with C₁
Rule 2 IF : Y₁
THEN: A₂₁ with C₂

ここで X₁, Y₁, A₁₁, A₂₁ は有限な全集合 X₀, Y₀, A₀ のそれぞれ部分集合を表しているとする。課題はいかにしてゴールあるいは仮説状態の確実性測度を推論するかということになる。

代表的な医療診断システムである MYCIN では、この目的のために直観的な結合関数が用いられた^{25),26)}。MYCIN の方法はエキスパート・システムにおける不確実な知識の扱いに大きな影響を与えたが、合理性の裏付けはなかった。Duda, Hart, Nilsson は Bayes の規則をエキスパート・システムの推論に向くように変形した主観的 Bayes の方法を提示している²⁷⁾。Bayes 確率とその変形に対する結合関数は筆者らにより示されている^{11),12)}。これらに対し、筆者ら^{12),14)} およびその他²⁸⁾⁻³⁰⁾ によりエキスパート・システムの不確実性

を伴う推論における Dempster & Shafer 理論^{31), 32)}の重要性が最近認識された。Dempster & Shafer 理論は主観にかかわる不確実性の理論的な扱いを可能とするものであり、SPERIL 第1版の推論機構はこの理論の拡張に基づいて設計されている。統計的な推論法ではしばしば証拠間の独立性等の理想化された仮定が課されるが、そのような仮定の成立が疑わしいときには、代替策としてファジィ理論³³⁾を基礎とする推論法が効果的となる^{12), 13)}。

AND/OR 関係とともに COMB 関係に対する推論手順が定義されれば、確実性測度は階層的推論ネットワーク中を伝搬することができる。そして最終的に、最終ゴールに至る確実性測度が求められ、これによって判定目的に対する合理的な回答を得ることができる。

3. Dempster & Shafer 理論とそのファジィ集合への拡張

主観的な不確実さを Bayes 確率によって扱うことに関する主要な批判は、Bayes 確率は無知量 (ignorance) を効果的に扱えないことである。換言すると、Bayes 確率では $P(A) + P(\bar{A}) = 1$ (\bar{A} は A の補集合) の関係が要求されるため、信用欠如 (lack of belief) と不信用 (disbelief) を区別できないことになる。

1967年、Dempster は主観的な不確実性を扱うために、下界および上界確率 (lower and upper probabilities) と名付けた有用な概念を提示した³¹⁾。Shafer はこの Dempster 理論を洗練させ、数学的な写像によって記述された量に主観的な意味を付与した³²⁾。Shafer は元来の下界、上界確率をそれぞれ信用度 (belief function)、尤度 (plausibility) と言い換えた。下界、上界確率は Dempster & Shafer (DS) の基本確率 (basic probability) によって定義される。Dempster の結合規則 (Dempster's rule of combination) は同一のゴール状態に関して異なる証拠から得られた二つ以上の DS の基本確率を統合する方法を与えている。

Shafer によれば、DS の基本確率は、部分集合 A_i にとじ込められているが A_i 内の各点に自由に動ける半可動確率質量 (semi-mobile probability mass) としてイメージを描くことができる。 A_0 を有限な全集合、 A_i ($i=1, 2, \dots$) をその部分集合とすると、DS の基本確率は次の条件を満たす関数 $m: 2^{A_0} \rightarrow [0, 1]$ で定義される；

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \quad (\phi: \text{空集合}) \\ \sum_{A_i \subseteq A_0} m(A_i) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

無知の程度は $m(A_0)$ によって表される。 $m(A_i) > 0$ のとき A_i は焦点要素 (focal element) と呼ばれる。

下界確率はこの DS の基本確率を用いて

$$P_*(A_i) = \sum_{A_j \subseteq A_i} m(A_j) \quad (2)$$

と定義される。すなわち、部分集合 A_i 内にとじ込められた DS の基本確率の和である。

m_1 と m_2 を独立な証拠により推論されたある仮説状態に関する DS の基本確率量とし、 A_{1i} と A_{2j} ($i, j = 0, 1, 2, \dots$) をそれぞれの焦点要素とすると、Dempster の結合規則はこれらの次式による結合によって新たな DS の基本確率が与えられるとしている。

$$m(A_k) = \frac{\sum_{A_{1i} \cap A_{2j} = A_k} m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j})}{1 - \sum_{A_{1i} \cap A_{2j} = \phi} m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j})} \quad (3)$$

$(A_k \neq \phi)$

2個以上の DS の基本確率の結合は、もしそれらが独立な証拠より推論されたものであれば、(3)式を順次適用することによって得られる。

Dempster & Shafer 理論のエクスパート・システムの推論への適用は容易である。証拠状態 X, Y とそれらにかかわる Rule 1, Rule 2 から仮説状態 A の確実性測度を求める図2の問題を考える。一つの推論手順は以下のようなものである。まず Rule 1 に対して各前提の下界確率 $P_*(X_1)$ を計算し、次にこれに確実性測度 C_1 を掛け、この量を次のように結論部で示された集合 A_{11} の基本確率として割り付ける。

$$m(A_{11}) = P_*(X_1) \cdot C_1 \quad (4)$$

同様に、Rule 2 と証拠状態 Y から $m(A_{21})$ を推論する。これら H に関する確率量の割付けを(3)式により統合する。

不確実性に加え、知識を明確規定の (crisp or non-fuzzy) 集合で表現するよりも、ファジィ集合³³⁾で表したほうが適当なことがある。たとえば後に記されるように、SPERIL で用いられている slight, moderate, severe なる表現は、十分に規定されてはいないが、専門家にとっては意味をなす表現である。ゆえに、この種の知識を活用するため、Dempster & Shafer 理論をその本質を失うことなくファジィ集合へ拡張する^{12), 14)}。この場合、Rule 1, Rule 2 の制約を示す集合 X_1, A_{11}, Y_1, A_{21} はメンバーシップ関数で特徴付けられるファジィ集合としてもよい。

Dempster & Shafer 理論の拡張のため、全集合 A_0

内のファジィ部分集合 A_1 が他のファジィ部分集合 A_2 に含まれる程度を次のように定義する。

$$I(A_1 \subseteq A_2) = \frac{\max_a \{1 - \mu_{A_1}(a) + \mu_{A_2}(a)\}}{\max_a \{\mu_{A_1}(a)\}} \quad (5)$$

ここで $\mu_{A_1}(a)$, $\mu_{A_2}(a)$ はそれぞれ A_1 , A_2 のメンバーシップ関数である。ファジィ集合 A_1 と A_2 が共通部分をもつ程度を次のように定義する。

$$J(A_1, A_2) = \frac{\max_a \{\mu_{A_1 \cap A_2}(a)\}}{\min\{\max_a \{\mu_{A_1}(a)\}, \max_a \{\mu_{A_2}(a)\}\}} \quad (6)$$

ここでファジィ集合理論に従い、共通集合 $A_1 \cap A_2$ は、

$$\mu_{A_1 \cap A_2}(a) = \min\{\mu_{A_1}(a), \mu_{A_2}(a)\} \quad (7)$$

で定める。ファジィ集合 A_1 と A_2 の共通部が ϕ (空集合) である程度を $1 - J(A_1, A_2)$ で定義する。

以上の定義により、(2)式、(3)式はそれぞれ次のように一般化される。

$$P_*(A_i) = \sum_{A_j} I(A_j \subseteq A_i) \cdot m(A_j) \quad (8)$$

$$m(A)_* = \frac{\sum_{A_{1i} \cap A_{2j} = A_*} J(A_{1i}, A_{2j}) m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j})}{\sum_{A_{1i}, A_{2j}} \{1 - J(A_{1i}, A_{2j})\} m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j})} \quad (A_* \neq \phi) \quad (9)$$

したがって、これによって不確実性と不明確性 (imprecision) を伴う一つの合理的な推論法が与えられた。

4. SPERIL システム

SPERIL はとくに地震振動を受けた建築物を対象とするルールに基づく被害査定のエクスパート・システムである。SPERIL 第1版の詳細は文献¹⁵⁾に記載されており、ここではその概要を述べる。SPERIL 第1版では観察された異なる証拠を統合するために、ファジィ集合へ拡張された Dempster & Shafer 理論による推論が採用されている。知識ベースに書かれている専門知識は、構造物被害モデル研究の第一人者である Purdue 大学土木工学科 J. T. P. Yao 教授から主として得られたものであり、構造物地震応答シミュレーションの第一人者である Illinois 大学土木工学科

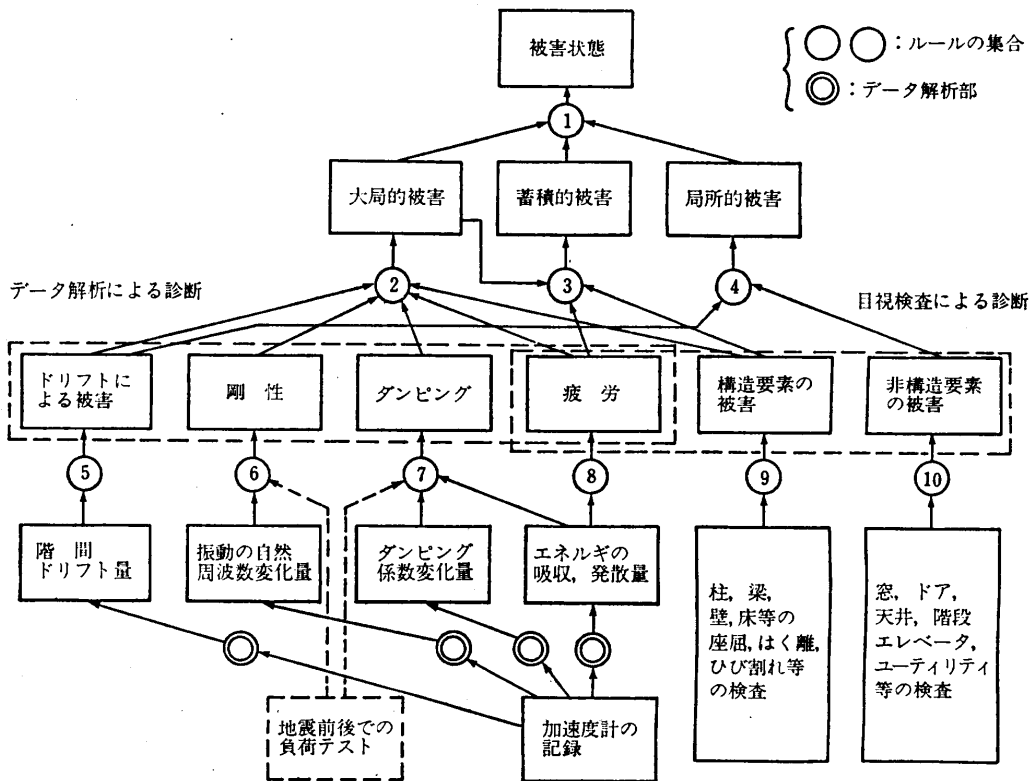


図3 SPERIL の推論ネットワーク
Fig. 3 Inference network of SPERIL.

表 1 SPERIL のルールの例

Table 1 Example of rules in SPERIL.

```

Rule0201
  IF:MAT is r/c
  THEN IF:STI is dest
  THEN:GLO dest 0.6
  ELSE IF:STI is seve
  THEN:GLO seve 0.6
  ELSE IF:STI is mode
  THEN:GLO mode 0.6
  ELSE IF:STI is slig
  THEN:GLO slig 0.6
  ELSE IF:STI is no
  THEN:GLO no 0.6
  ELSE:GLO uk

Rule0501
  IF:MAT is r/c
  THEN IF:ISD <= -8.9
  THEN:DRI uk 1
  ELSE IF:ISD <= 0.4
  THEN:DRI no 0.9
  ELSE IF:ISD <= 0.8
  THEN:DRI slig 0.9
  ELSE IF:ISD <= 1.3
  THEN:DRI mode 0.9
  ELSE IF:ISD <= 2.0
  THEN:DRI seve 0.9
  ELSE IF:ISD > 2.0
  THEN:DRI dest 0.9
  ELSE:DRI uk

```

Abbreviations

dest	destructive
seve	severe
mode	moderate
slig	slight
no	no
uk	unknown

r/c	reinforced concrete
-----	---------------------

GLO	damage of global nature
DRI	damage due to drifting
STI	damage of stiffness
VST	visual damage of structural member
MAT	material of structure
ISD	interstory drift

M. A. Sozes 教授からのデータと意見を一部参考にして得られている。

本被害判定に役立つ主たる情報源は (i) 建築物各所の目視による検査^{34), 35)} と, (ii) 地震期間中に得られた建築物に設置された地震計記録の解析³⁶⁾ である。これらのデータの解釈は建築物の構造材料, 高さ, 設計等の個々の条件により大きく影響される。小知識は図 3 の組織化に基づいて集積されており, 所定のルール形式で知識ベースに書かれている。

ルールの形式は表 1 に例示されているように, 人間およびコンピュータがともに容易に解読できるように設計されている。ルール第 1 行の 4 数字のうち最初の 2 数字はルール集合の番号であり, 図 3 のノード番号に対応している。ファジィ等級をもつ知識を表現するために, 次のファジィ部分集合表現が許されている。

no, slig(slight), mode (moderate),

seve (severe), dest (destructive),

uk (unknown—全集合)

これらのメンバーシップ関数は図 4 のように与えられ

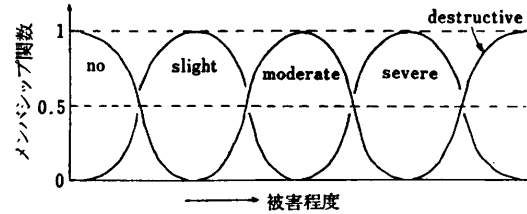


図 4 SPERIL で使われているファジィ部分集合のメンバーシップ関数

Fig. 4 Membership functions of fuzzy subsets used in SPERIL.

ている。ルールの機能としては, プロダクション・システムの基本機能, すなわち“もし前提が満たされていれば, 動作を実行する”が強調されている。動作は this case, 部分ゴールに対応する STM と名付けられたメモリの更新である。

STM はプロダクション・システムというグローバル・データベース中のデータに相当し, ここでは推論のための作業メモリとして働き, 入力データまたは推論されたデータが蓄えられる。SPERIL 第 1 版では STM は内容により次の 4 種類に分類されている。

Type 1 ファジィ等級の確実性測度

Type 2 言語データ

Type 3 数値データ

Type 4 yes-no データ

STM がアクセスされるとき, この種別が参照され, ルール文の適切な翻訳へと進む。

推論ネットワークの深さはとくに深くないので, 効率的な探索は特別に配慮されていない。ルール集合の適用順序は一応次のように前もって定められている。

“05”, “06”, “07”, “08”, “09”,

“10”, “02”, “03”, “04”, “01”。

これはボトム・アップ探索あるいはデータ駆動形探索に相当している。

推論プロセスはルールベース内の関連するルールを見だし, 評価する。前提評価時にもし STM がまだ書き込まれていない, あるいはまだ回答されていないことがわかると, データを得るために質問が発せられる。質問文は質問ファイルを参照して発せられる。わずらわしい不必要な質問の発生を避けるため, 制御フローには動作文が起動される可能性がない場合に対してスキップ経路が設けられている。これによって推論のための必要最小限の質問が発せられる。

1 ルールの処理後, 結果は指定された STM の更新に使用される。Type 1 の STM に対しては, 独立な

証拠からの推論として、更新は第3節に記された拡張された Dempster & Shafer 理論によって実行される。最終判定は被害状態に対応する最終ゴールにおけるファジィ部分集合の DS の下界確率に基づいてなされる。どのファジィ部分集合も所定の閾値 (0.2) 以上の下界確率が得られなかった場合には“適当な回答なし”が選択される。したがって、回答は次のどれかとなる。

- 1) no damage
- 2) slight damage
- 3) moderate damage
- 4) severe damage
- 5) destructive damage
- 6) no appropriate answer

修理、補強に関する知識はまだ組み込まれていない。

5. む す び

建築物被害査定のエクスパート・システム SPERIL 第1版の推論理論と構成を示した。パターン認識でいう認識率のような性能評価は、系統だった事例が不足しているため得られていないが、専門家である J.T.P. Yao 教授からは彼の判断と矛盾しないとの評価を得ている(事例不足の問題ゆえに、パターン認識的接近が困難であり、専門家の知識に頼るエクスパート・システムの方法が採用されたことを想起されたい)。同時に、現在のルールをより特定な条件の対象に対する、より詳細なルールに置き換えていく努力も必要であることが指摘されている。専門家からのシステムティックな知識獲得法は残された課題の一つである。

謝辞 Purdue 大学 Prof. James T. P. Yao (School of Civil Eng.), Distinguished Prof. K. S. Fu (School of Electrical Eng.) のご援助に感謝します。また東大生研尾上守夫教授、安田靖彦教授、阪大基礎工田中幸吉教授からもご支援いただいたことを記し感謝します。

参 考 文 献

- 1) Yao, J. T. P.: Damage Assessment and Reliability Evaluation of Existing Structures, *J. Eng. Struct.*, Vol. 1, pp. 245-251 (1979).
- 2) Culver, C. G. et al.: Natural Hazards Evaluation of Existing Buildings, *NBS Building Sci.*, Series 61, NBS, Washington (1975).
- 3) Whitman, R. V. et al.: Seismic Resistance of Existing Buildings, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 106, pp. 1573-1592 (July 1980).
- 4) Bresler, B. et al.: Practical Evaluation of Structural Reliability, *ASCE Conv. & Exp.* Reprint 80-596 (1980).
- 5) Pardoen, G. C. et al.: Damage Assessment of Imperial Service Bldg., *ASCE Conv. & Exp.*, Reprint 80-680 (1980).
- 6) Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: Pattern Recognition and Damage Assessment, ASCE EMD Specialty Conf. (1979).
- 7) Fu, K. S.: Recent Development in Pattern Recognition, *IEEE Trans. Comput.* Vol. C-29, No. 10, pp. 845-854 (1980).
- 8) Shortliffe, E. H. et al.: Knowledge Engineering for Medical Decision Making: A Review of Computer-Based Clinical Decision Aids, *Proc. IEEE*, Vol. 67, No. 7, pp. 1207-1224 (1979).
- 9) Kulikowski, C. A.: Artificial Intelligence Methods and Systems for Medical Consultation, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-2, No. 5, pp. 464-476 (1980).
- 10) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: Inference Method for Damage Assessment System of Existing Structures, Purdue Univ., Civil Eng., CE-STR-80-17 (1980).
- 11) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: Inexact Inference for Rule-based Damage Assessment of Existing Structures, *IJCAI* (1981).
- 12) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: Inference Procedure with Uncertainty for Problem Reduction Method, Purdue Univ., Civil and Elec. Eng., CE-STR-81-24 and TR-EE 81-33 (1981); also to appear in *Info. Sci.*
- 13) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: A Rule-Inference Method for Damage Assessment, *ASCE Conv.*, Preprint 81-502 (1981).
- 14) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: A Rule-based Inference with Fuzzy Set for Structural Damage Assessment, M. M. Gupta (ed.), *Approximate Reasoning in Decision Analysis*, North Holland Pub. Co., Amsterdam (1982).
- 15) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: SPERIL-1: *Computer-Based Structural Damage Assessment System*, Purdue Univ., Civil Eng., CE-STR-81-36 (1981).
- 16) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: SPERIL: An Expert System for Damage Assessment of Existing Structures, *ICPR* (1982).
- 17) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: A Decision Support System Using Uncertain and Fuzzy Information, *Int'l Workshop on Advanced Automation*, Taipei (1982).
- 18) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P.: Computer-Based Systems for the Assessment

- of Structural Damage, 2nd IABSE Colloquium on Informatics in Structural Eng., Bergamo, Italy (1982).
- 19) Yao, J. T. P., Toussi, S., and Sozen, M. A.: Damage Assessment from Dynamic Response Measurements, Sympo. on Structural Reliability and Damage Assessment, 9th U.S. National Congress of Applied Math., Ithaca, New York (1982).
- 20) Feigenbaum, E. A.: The Art of Artificial Intelligence: Themes and Case Studies of Knowledge Engineering, IJCAI (1977).
- 21) Nilsson, N. J.: *Problem-Solving Method in Artificial Intelligence*, McGraw-Hill, New York (1971).
- 22) Nilsson, N. J.: *Principles of Artificial Intelligence*, Tioga Pub. Co., Palo Alto (1980).
- 23) Waterman, D. A. and Hayes-Roth, F.: An Overview of Pattern-Directed Inference Systems, the same authors (ed.), *Pattern-Directed Inference Systems*, Academic Press, New York (1978).
- 24) Davis, R. et al.: Production Rules as a Representation for a Knowledge-based Consultation Program, *Artificial Intelligence* Vol. 8, No. 1 (1977).
- 25) Shortliffe, E. H. and Buchanan, B. G.: A Model of Inexact Reasoning in Medicine, *Math. Biosci.* Vol. 23, pp. 351-379, (1975).
- 26) Shortliffe, E. H.: *Computer-Based Medical Consultation: MYCIN*, American Elsevier, New York (1976).
- 27) Duda, R. O., Hart, P. and Nissson, N. J.: Subjective Bayesian Methods for Rule-based Inference Systems, NCC (1976).
- 28) Barnett, J. A.: Computational Methods for a Mathematical Theory of Evidence, IJCAI (1981).
- 29) Friedman, L.: Extended Plausible Inference, *ibid.* (1981).
- 30) Garvey, T. D. et al.: An Inference Technique for Integrating Knowledge from Disparate Sources, *ibid* (1981).
- 31) Dempster, A. P.: Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping, *Annals of Math. Stat.*, Vol. 38, pp. 325-339 (1967).
- 32) Shafer, G.: *A Mathematical Theory of Evidence*, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J. (1976).
- 33) Zadeh, L. A.: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, *IEEE Trans. Syst. Man & Cyb.*, Vol. SMC-3, pp. 28-44 (1973).
- 34) Dowrick, D. J.: *Earthquake Resistent Design*, John Wiley & Sons, New York (1977).
- 35) 久田俊彦(編): 地震と建築, 鹿島出版会, 東京 (1974).
- 36) Hart, G. C. and Yao, J. T. P.: System Identification in Structural Dynamics, *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 103, pp. 1089-1104 (1977).

(昭和 57 年 1 月 26 日受付)

(昭和 57 年 12 月 6 日採録)