【土木学会論文集 第380号／I-7 1987年4月】

構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎的研究

APPLICATION OF FUZZY SET THEORY TO SERVICEABILITY DIAGNOSIS OF STRUCTURES

西村　昭*・藤井　学**・宮本文穂***・小笠　勝****

By Akira NISHIMURA, Manabu FUJII, Ayaho MIYAMOTO and Masaru OGASA

When the fuzzy set theory is applied to serviceability diagnosis of structures, the problem of the estimation of a membership function which translates a subjective information related to diagnosis into a mathematical model is often pointed out.

In this paper, an attempt is made to formulate the membership function using a function with various parameters for evaluation of the subjective uncertainty on the diagnosis. And a process of serviceability diagnosis of structures based on such a membership function in the fuzzy set theory is discussed in detail. In order to make a quantitative comparison between the results by the present method and those by the previous one, several numerical examples are made.

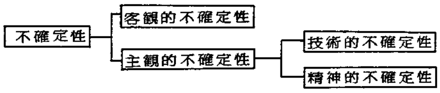
Keywords : *serviceability diagnosis, fuzzy set theory, membership function, subjective uncertainty, reinforced concrete slab*

1. まえがき

構造物を適切に維持，管理していくうえで，補修，補強の必要性の有無の判断，あるいは耐荷力，余寿命の推定を的確に行うことが，必要不可欠となる．これらは，とりもなおさず対象構造物の現状を正確に把握すること，すなわち，健全度診断の必要性を意味する．しかし，構造物の健全度診断の現状では，過去の研究や技術的経験，あるいは直感に基づき，損傷の程度，および原因は推測し得るが，それらを定量的かつ確定的に把握し，そのシステムをモデルとして表現するには至っていないといえる．このように，構造物の診断を困難かつ複雑にしている原因の1つとして，種々の不確定性の存在を挙げることができる．従来より，構造安全性に関与する不確定要因を，確率・統計論的に扱い得る不確定性（客観的不確定性），および人間の過誤や社会的，政治的風土といった，ランダムな現象として扱うことのできない主観に基づく不確定性（主観的不確定性）の2つのグループに大別し，安全性評価を考える必要があることが指摘されている[1),2)]．

本研究では，健全度診断に関与する主観的不確定性を，さらに，その性質により，技術的不確定性と精神的不確定性とに分類するものとする（図―1参照）．ここで，技術的不確定性を，知識不足や対象の複雑さ等に起因する不確定性と定義する．すなわち，技術的不確定性は，測定技術や解析技術の向上，もしくは経験の蓄積等により，あいまいさを小さくすることが可能な不確定性と考えることができる．健全度診断に関与する技術的不確定性としては，検査・測定方法，構造解析モデル，および損傷・劣化の相互作用等にまつわる不確定性を挙げることができる．一方，精神的不確定性を，人間本来の主観に起因する不確定性と定義する．すなわち，精神的不確定性は，分析を進めたからといって，いつかはあいまいさが完全になくなるという性質のものではなく，ある技術者が，技術的不確定要因に対して何らかの評価を行う場合に，その根底となる主観的不確定性と考えることができる．たとえば，技術者の性格，生活背景や評価者としての経験や才能等の不確定性を表わすものとする．これらの不確定性の中で，客観的不確定性が，構造安全性解析の際に，確率論を基礎とする信頼性理論で扱われて

* 正会員　工博　神戸大学教授　工学部土木工学科
（〒657　神戸市灘区六甲台町1-1）
** 正会員　工博　神戸大学助教授　工学部土木工学科
（同上）
*** 正会員　工博　神戸大学助手　大学院自然科学研究科
（同上）
**** 正会員　工修　三菱重工業(株)神戸造船所
（〒652　神戸市兵庫区和田崎町1-1-1）



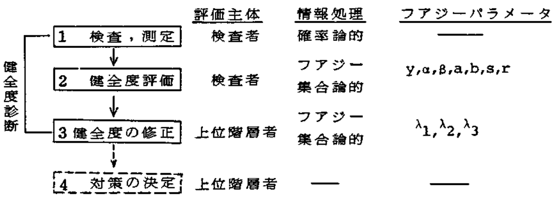
図—1　不確定性の分類

いることは周知のとおりである．一方，主観的不確定性を数学的に取り扱うための1つの手法として，ファジー集合論の概念が，1965年にL. A. Zadeh[3]によって提案されている．

本研究の目的は，健全度診断にあたって不可避の主観的不確定性を認めたうえで，これらを積極的に取り入れ，ファジー集合論を適用することにより，より現実的かつ合理的な診断を可能にしようとするものである．具体的には，ファジー集合論の適用に際して，主観的不確定性の数学的表現方法である帰属度関数の合理的な決定法の検討を行った．すなわち，より多くの技術的不確定性を，帰属度関数の決定のためのパラメーターとして扱い，より現実的かつ柔軟な帰属度関数の決定を試みる．そして，このような帰属度関数を用いて，ファジー事象の確率の概念[4]を適用することにより，客観的に得られた検査，測定結果から主観的評価を行うための健全度評価手法を提案する．さらに，主観に基づく評価結果には，評価者自身の精神的不確定性が存在すると考え，構造物の管理者や評価者の上司らが，評価結果を修正して理解するプロセスについても検討を行い，その修正手法の提案を行う．また，これらの手法による数値計算例として，道路橋RC床版の健全度評価を試みた．

2.　ファジー集合論を用いた健全度評価法

本研究では，構造物の健全度診断の基本的な流れを，図—2に示すように位置づけ，これに従って診断を行うもので，次のプロセスより成る．まず，客観的に得られた検査結果から，検査者が，種々の技術的な主観的不確定要因を考慮して健全度診断を行う．さらに，検査者から健全度判定結果に関する報告を受けた構造物の管理者，検査者の上司，あるいは専門的な権威者らの上位階層者が，検査者の経験の程度や性格といった精神的な主観的不確定性を考慮に入れて，検査者による評価結果を修正して，最終的な健全度を推定する．



図—2　健全度診断のフロー

以下に，図—2に示したフローに従って，本研究で提案する健全度診断法を述べる．

（1）　検査，測定

検査者が，構造物に対して，非破壊的検査あるいは載荷試験を行い，これより得られる客観的な検査結果のばらつきは，一般に，ランダムな現象として確率論的に扱われる．

いま，検査項目 X について，検査結果が，集合 U（$u \in U$）上で平均値を m_X，標準偏差を σ_X とする正規分布に従うものとすれば，検査結果の確率密度関数 $p_X(u)$ は，$p_X(u)=N(m_X, \sigma_X^2)$ で与えられる．また，検査結果が，決定論的に得られる場合についても，$\sigma_X \cong 0$ として，確率論的に扱えるものとする．すなわち，検査結果を x とすると，$m_X=x$, $\sigma_X=0$ より，次式で表わされるものとする．

$$\begin{cases} p_X(m_X)=p_X(x)=1 & (u=m_X) \\ p_X(u)=0 & (u \neq m_X) \end{cases} \quad \cdots\cdots(1)$$

（2）　検査者による健全度評価

検査結果から健全度評価を行う手順として，まず，検査結果の特性値への変換を考える．ここで，特性値とは，健全度の指標となるパラメーターの示す値のことである．たとえば，検査項目が構造物の卓越振動数や材料強度であったとすると，特性値として，剛性の低下率や材料強度の低下率，あるいは，作用応力に対する安全率などを考える必要がある．検査結果から特性値を推定する場合に，次のような技術的不確定性が存在すると考えられる．

① 実構造物と解析モデルとのギャップ，
② 解析に適用する手法および精度，
③ 検査方法および検査精度，
④ 他の損傷要因の検査結果に及ぼす影響，
⑤ 検査結果と特性値との関係，等．

これらの技術的不確定性を考慮に入れて，検査結果から特性値を推定するために，ファジー集合論を適用する．いま，検査結果は，定量的に確率分布として得られており，確率分布と主観的不確定性を関係づける手法として，ファジー事象の確率の概念をファジー関係[5]に応用する．ファジー事象の確率は，ファジー集合によって表現されるあいまいな事象がどれくらいの割合で生起するかの可能性として定義される．いま，標本空間 X における確率密度関数が $p(x)$ で与えられ，ファジー事象 A を帰属度関数 $\mu_A(x)$ で表わすものとすると，ファジー事象の確率 $P(A)$，すなわち，ファジー事象 A の生起する確率は，次式で定義される．

$$P(A)=\int_X \mu_A(x) \cdot p(x)dx \quad \cdots\cdots(2)$$

このような概念は，生起に関するあいまいさが確率で

表現され，事象の内容のあいまいさはファジー集合で表わされており，診断のような，客観的情報から主観的に評価を行う問題に適していると考えられる．

次に，検査結果を特性値に変換することを考える．いま，検査結果の集合を X，特性値の集合を Y とすると，特性値の推定は，X から Y への写像 $f : X \to Y$ と考えることができる．ただし，特性値の推定には，先にも述べたように種々の技術的不確定性が存在し，これらを考慮するために，X から Y への写像をファジー関係 $R1$ で次式のように定義する．

$$R1=\int^{*}_{X\times Y}\mu_{R1}(x, y)|(x, y) \cdots\cdots (3)$$

ここに，$\int^{*}$ は，和集合を意味し，通常の積分記号と区別するものとする．

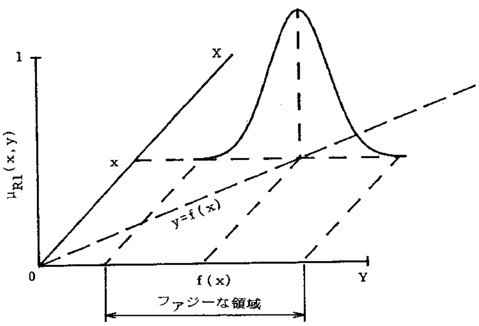
ファジー関係 $R1$ は，帰属度関数 $\mu_{R1}(x, y)$，$x\in X$，$y\in Y$ で特性づけられる．そこで，帰属度関数 $\mu_{R1}(x, y)$ が複数のパラメーターで比較的任意に決定できる Π 関数[7]を応用して，次式で表わされるものと仮定する．

$$\mu_{R1}(x, y)=\alpha\cdot\Pi(y\,;f(x)+\beta-a, f(x)+\beta, f(x)+\beta+b) \cdots\cdots (4)$$

ここに，$f(x)$ は理論や過去の実験により明らかにされている法則に基づいて決定される関数である（図―3参照）．また，α，β，a，b は，検査者によって主観的に決定されるパラメーターであり，図―4に示すように，それぞれ，次の性質を表わすものと考える．

① パラメーター α は，帰属度関数のピークの高さを表わし，$0\leqq\alpha\leqq1$ の範囲で定義される．ここで，α は，検査結果 x と特性値 y との関係を $y=f(x)$ と置くことについての自信の程度を表わすものとする．

② パラメーター β は，帰属度関数のピークが $y=f(x)$ からずれる大きさを表わすものであり，主に検査や解析の手法あるいは精度に起因する不確定性の大きさを表わす．たとえば，シュミットハンマーによる場合のように，ある種の非破壊的検査によって得られる材料強度は，真の強度より β kgf/cm^2 くらい小さいといったような過去の経験的知識を表わす．



図―3　ファジー関係の考え方

③ パラメーター a および b は，ファジー関係 $R1$ のあいまいさの程度，つまり，帰属度関数のばらつきの大きさを表わし，種々の主観的不確定要因の総合評価として，主観的に決定される．

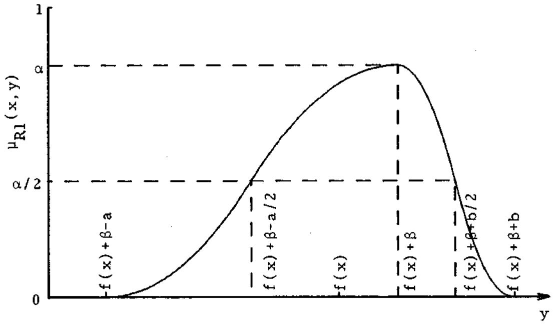
以上より，検査結果と特性値との関数および，それにまつわる不確定性を表わすパラメーターが，検査者の主観に基づいて決定されると，式（3），式（4）よりファジー関係 $R1$ が決定でき，たとえば，図―5のように表わされる．このファジー関係 $R1$ を用いて，確率論的に得られた検査結果から特性値を推定することができる．すなわち，ファジー事象の確率（式(2)）を，二次元の空間 $X\times Y$ 上で考えることにより，ファジー集合 Y の要素 $y(y\in Y)$ におけるファジー事象 A の生起する可能性 $P_A(y)$ は，次式で定義されるものとする．

$$P_A(y)=\int_X \mu_{R1}(x, y)\cdot p_A(x)dx \cdots\cdots (5)$$

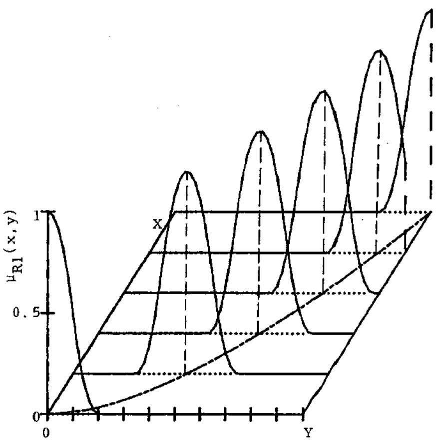
これより，確率分布 $p_A(x)$ が得られたときのファジー集合 Y における y の生起する可能性分布は，式（5）の和集合をとることにより次式のように得られる．

$$P_A=\int^{*}_{Y} P_A(y)=\int^{*}_{Y}\int_X \mu_{R1}(x, y)\cdot p_A(x)dx \cdots\cdots (6)$$

ここまでは，検査結果から特性値を推定する場合につ



図―4　あいまいパラメーター（α, β, a, b）



図―5　ファジー関係 $R1$ の例

いて考えてきた．次に，特性値から健全度を評価する手法について考える．

これに先立ち，まず，健全度を定義する必要がある．しかし，現状では，健全度を客観的に定義することは困難であり，抽象的な表現とならざるを得ない．ここでは，健全度を，「構造物が，規定の機能を達成し得る程度」と定義し，健全度の集合 S を区間〔0, 1〕で定義する．

$$S=\{s\,|\,s\in[0,1]\} \qquad (7)$$

ここで，$s=1$ は，構造物が，規定の機能を十分に達成し得る状態を，一方，$s=0$ は，規定の機能を全く達成し得ない状態を表わすものとする．このとき，健全度の集合 S は，健全度の定義が定性的であるが故に，ファジー集合であると考えることができる．すなわち，健全度の定義そのものが検査者の経験や構造物の安全性に対する考え方，あるいは検査者の性格などにより検査者ごとに異なり，ファジー集合としての取り扱いが必要となる．

特性値から健全度を推定する場合，健全度の定義に関するあいまいさのほかに，次のような 2 種類の技術的な主観的不確定性を考慮するものとする．

① 特性値の重要度：この不確定性は，特性値（Y）と健全度（S）とが，ファジー関係で表わされる場合の関数 $s=f(y)$ に関するあいまいさである．たとえば，特性値 y（曲げ剛性や材料強度の低下率など）が，α% 程度減少していることが検査結果から判明した場合，検査者が「α% も減少しているから危険である」と考えるか，あるいは「α% しか減少していないから安全である」と考えるかは特性値の重要度に関係してくると考えられる．このように，$s=f(y)$ を，その特性値を重大と考えるか大したことはないと考えるかで言語変数（High, Medium, Low Importance）を用いて模式的に表わすと，図—6 のようになると考えられる．

② 特性値の確信度（確度）：確信度（確度）は，著者ら[6]が提案した概念であり，各判定因子（本研究では特性値）による健全度評価の正確さの度合と定義され，また，各判定因子ごとにおいても，対象となる構造物の状態（健全度のレベル）に応じて，測定結果の信頼度が，異なるという不確定性を表わすものである．本研究では，図—7 に示すように確信度つまり，結果に対する信頼度は，帰属度関数のばらつきの程度 r で表わされると考え，r は特性値 y の関数 $r=g(y)$ で表わされるものとする．このような関数の代表的なパターンとして，ⓐ：良否の極端なときに確信度が高い（r が小さい），ⓑ：全般に確信度が高い，ⓒ：y が小さい側で確信度が高いという 3 つのパターンを，模式的に図—8 に示す．

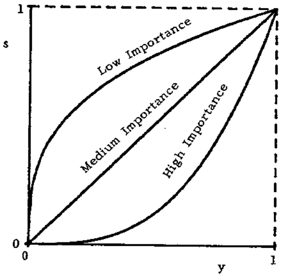
以上，2 種類の主観的不確定性を考慮して，特性値から健全度評価を行う．この場合も，検査結果と特性値との関係をファジー関係 $R1$ で表わしたのと同様に，特性値の集合 Y と健全度の集合 S とをファジー関係 $R2$ で関係づけ，帰属度関数 $\mu_{R2}(y, s)$ で特性づける．すなわち，

$$R2=\int^{*}_{Y\times S}\mu_{R2}(y,s)|(y,s) \qquad (8)$$

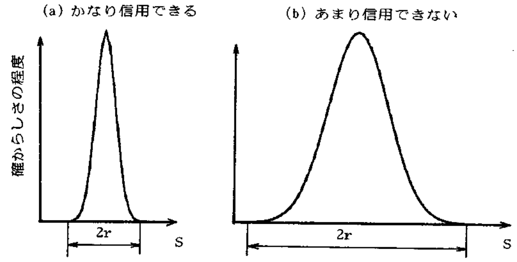
そこで，$\mu_{R1}(x,y)$ を決定したときと同様の考え方により，$\mu_{R2}(y,s)$ を決定する．すなわち，特性値の重要度から，写像 $f: Y\rightarrow S$ の基本となる関数 $s=f(y)$ を決定し，$s=f(y)$ のまわりに，特性値の確信度に応じたばらつき $r=g(y)$ を考慮することにより $\mu_{R2}(y,s)$ が決定されるものとする．いま，$\mu_{R2}(y,s)$ が Π 関数で表わされるものとすると，ファジー関係 $R2$ は，次式，ならびに図—9 のように表わせる．

$$\mu_{R2}(y,s)=\Pi(s\,;f(y)-g(y),f(y),f(y)+g(y)) \qquad (9)$$

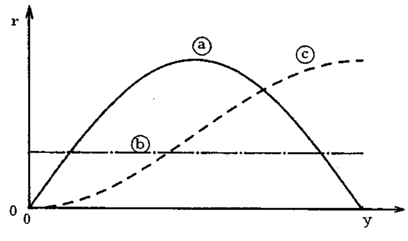
以上のように，ファジー関係 $R2$ が決定されれば，次式のような帰属度を有するファジー合成 R（$R_1\circ R_2$）を考えることにより，検査結果（確率分布）から，健全



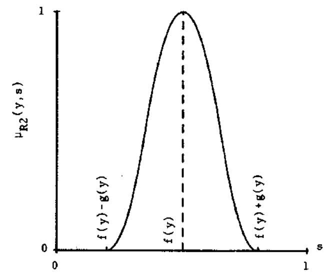
図—6 特性値の重要度



図—7 特性値の確からしさ



図—8 確信度（確度）分布のパターン



図―9　ファジー関係 $R2$ の Π 関数

度の可能性分布を求めることができる．

$$\mu_R(x, s)=\max_y \cdot \min\left[\mu_{R1}(x, y), \mu_{R2}(y, s)\right] \cdots\cdots\cdots(10)$$

これより，式（5），式（6）と同様に，検査結果が，確率密度関数 $p_A(x)$ で得られた場合の，健全度（s）の可能性および可能性分布がそれぞれ次式により得られる．

$$P_A(s)=\int_X p_A(x)\cdot\mu_R(x, s)dx \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

$$P(A)=\int_S P_A(s) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

（3）　上位階層者による健全度の修正

検査者が，客観的な検査結果に基づいて健全度を評価する場合，先にも述べたように，技術的な知識や経験の不足から，評価には検査者の主観が含まれてくる．つまり，同一の検査結果から健全度を評価する場合においても，評価結果には個人差が生ずることが予想される．そこで，構造物の管理者や検査者の上司等の上位階層者が，検査者から健全度の評価結果に関する報告を受けて，最適な行動の決定をしようとするときに，検査者の経験の程度や性格あるいは，表現のあいまいさなどの人間的な主観的不確定性（精神的不確定性）を考慮して，これらを修正して理解する必要がある．そこで，本研究では，精神的不確定性を考慮して，検査者による評価結果 S を修正し，修正後の最終的な評価値 E を得るための手法を，図―10 に示すフローと考え，以下にこれを説明する．

まず，評価結果 S から，確率論における平均値や分散と同様の統計量 m_S，σ_S^2 を，可能性 $P_A(s)$ に対して，Zadeh[3] の提案した手法を適用することにより次式のように抽出する．

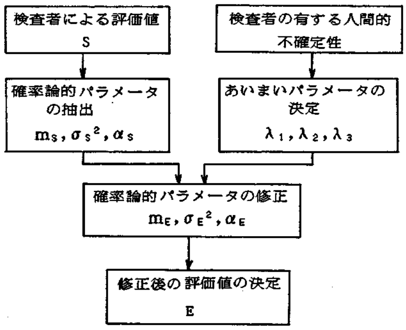
$$m_S=\frac{1}{P_S}\int_S s\cdot P_A(s)ds \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

$$\sigma_S^2=\frac{1}{P_S}\int_S (s-m_S)^2 P_A(s)ds \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

ただし，

$$P_S=\int_S P_A(s)ds \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

また，もう１つのパラメーターとして，可能性分布の最



図―10　評価値の修正法

大値 α_S を次式で考える．

$$\alpha_S=\max_{s\in S}(P_A(s)) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

次に，パラメーター m_S，σ_S^2，α_S を，上位階層者の主観により修正することを考える．ここで，m_S，σ_S^2，α_S を修正するための主観的なパラメーターを，それぞれ λ_1，λ_2，λ_3 とする．健全度の集合 S および E が区間〔0, 1〕で定義されることを考えて，修正後の平均値 m_E は，次式で与えられるものとする．

$$m_E=\begin{cases} m_S+\lambda_1-\lambda_1\cdot m_S & (0\leqq\lambda_1\leqq 1) \\ m_S+\lambda_1\cdot m_S & (-1\leqq\lambda_1\leqq 0) \end{cases} \cdots\cdots\cdots(17)$$

すなわち，λ_1 は，$-1\leqq\lambda_1\leqq 1$ で定義されるものとし，$\lambda_1>0$ のとき，修正後の健全度 E は危険側に評価され，$\lambda_1<0$ のとき，E は安全側に評価されることを示している（図―11 参照）．

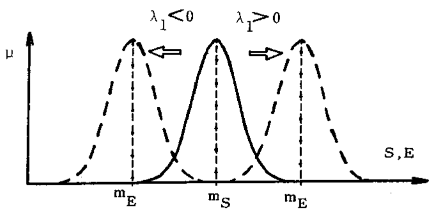
次に，λ_2 は，$0<\lambda_2<\infty$ の範囲で定義され，σ_E^2 が次式で決定されるものとする．

$$\sigma_E^2=\lambda_2\cdot\sigma_S^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

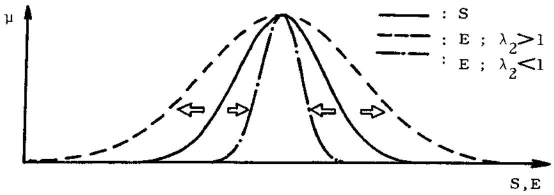
このとき，$0<\lambda_2<1$ の範囲で，λ_2 は，あいまいさを小さくするように作用し，$1<\lambda_2<\infty$ であいまいさを大きくするように作用することを表わしている（図―12 参照）．

最後に，α_S，α_E は，$\alpha\in$〔0, 1〕で定義されるから，λ_3 による修正（ピークの高さの修正）は，λ_1 による m_S の修正と同様に考えて，λ_3 の定義域を $-1\leqq\lambda_3\leqq 1$ とし，次式から α_E が決定できるものとする．

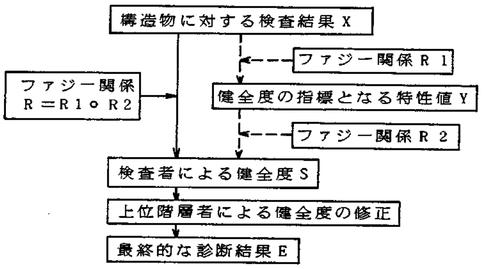
$$\alpha_E=\begin{cases} \alpha_S+\lambda_3-\lambda_3\cdot\alpha_S \\ \alpha_S+\lambda_3\cdot\alpha_S \end{cases} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$



図―11　λ_1 による修正



図—12 λ_2による修正



図—13 健全度診断法

以上の修正後の確率的なパラメーター m_E, σ_E^2, α_E を用いて，修正後の可能性分布 $P_A(e)$ は，その分布形が正規分布と相似であると仮定することにより，次式で得られるものとする．

$$P_A(e)=\alpha_E\cdot\exp\left\{-\frac{(e-m_E)^2}{2\cdot\sigma_E^2}\right\} \cdots\cdots\cdots(20)$$

以上，ファジー集合論を適用した構造物の健全度診断法についての提案を試みた．すなわち，健全度診断にまつわる種々の主観的不確定性から，ファジーパラメーターを決定し，それらによってファジー関係を構成する．そして，客観的に得られた検査結果とファジー関係との演算により，健全度を推定するものである．図—13に，本手法の全体的なフローを示す．

3. 道路橋 RC 床版の健全度評価

橋梁構造の中でも特に酷しい使用条件下に置かれている道路橋 RC 床版に注目し，著者ら[8]が過去に行った力学的試験データに対して，2. で提案した健全度診断法の適用を数値計算例として試みる．ここでは，健全度評価のための検査項目として，比較的信頼度の高い判定因子と考えられる[9]卓越振動数比（健全時の卓越振動数に対する損傷時の卓越振動数の比，f_i/f_0）と，各管理機関において，一般に行われている検査項目であるひびわれ密度を取り上げた．

（1） あいまいパラメーターの選定

健全度評価を実行するにあたり，まず，各あいまいパラメーターを選定する必要がある．それらは，種々の主観的不確定性の大小を表わすものであり，式（4），（9），(17)，(18) および (19) において，$f(x)$, α, β, a, b, $f(y)$, $g(y)$, λ_1, λ_2, λ_3 として含まれる．このうち，精神的不確定性に基づくパラメーター，λ_1, λ_2, λ_3 については，後ほど考察することとし，まず，検査者による健全度診断について，これらにまつわる技術的不確定性，すなわち，$f(x)$, α, β, a, b, $f(y)$, $g(y)$ を，各判定因子に対して主観に基づいて選定を行った．ただし，ここでは，各床版ごとの検査時の状況や，検査方法が十分明らかでないため，本来なら検査状況をも考慮して選定すべき各パラメーターであるが，各床版に対して，このような不確定性は同一の大きさであるとして扱った．

① 卓越振動数比，f_i/f_0

まず，ファジー関係 $R1$（図—13参照）に関係するパラメーター，$f(x)$, α, β, a, b の選定を行う．卓越振動数の測定結果 f_i は，設計計算書等から算出される健全時の固有振動数（f_0）との比，f_i/f_0 をもって検査結果 x とするものとする．このとき，卓越振動数比から導かれる健全度の指標は，一般に版剛度の低下率（D_i/D_0，ここで，D_0, D_i はそれぞれ健全時および損傷時の版剛度）として表わされるため，これをもって特性値 y とする．x と y の関係は $y=x^2$ で表わされ，このような関係は理論的にも容易に導くことができるため[12]，$f(x)=x^2$ とおくことに対するあいまいさはないものと考え，$\alpha=1$ とする．しかし，f_0 が理論値であるため，構造解析モデルに関するあいまいさが存在する．具体的には，支持条件や断面諸量の扱い，あるいは舗装部分の影響などに不確定性が存在すると考えられる．このような構造解析モデルに関するあいまいさはある程度予測でき，主観的に $\beta=0.05$ (5% 安全側へずらす) と仮定する．また，パラメーター a, b は，検査方法や検査時の環境による誤差，あるいは他の部材の損傷（たとえば横桁などの損傷の影響）による誤差を考慮して，左右対称に $a=b=0.05$ と仮定する．これらより，ファジー関係 $R1$ は，式（4）より決定できる．

次に，ファジー関係 $R2$ に関するパラメーターを決定する．ファジー関係 $R2$ は，特性値から健全度を推定する場合の不確定性を表わすと考えるため，ここでは版剛度の低下率 y と健全度 s との関係より得る．いま，仮に版剛度が 50% 低下した場合を考えると，このときの健全度は非常に低い状態にあるといえる．すなわち，特性値としての版剛度の低下率は，健全度に大きな影響を及ぼす因子であると考え，このような関係を模式的に表わす関数を $s=f(y)=y^2$ とする（図—6 (High) 参照)．また，$r=g(y)$ は，版剛度の低下率と健全度との相関が健全度のレベル全般にわたって非常によいと考えて，$r=0.05$ と，ばらつきの程度を一定とする．

これらより，ファジー関係 $R2$ は，式（9）より決定できる．

② ひびわれ密度

ひびわれ密度と健全度の関係は，経験的に線形関係にあると考えられているが[11]，その明確な対応関係は明らかにされているとはいえない．また，ひびわれ密度の測定には主観が入りやすく，検査者によって検査結果に個人差が生じやすいと考えられる．このようにひびわれ密度による健全度評価には多くの不確定性を含んでいる．そこで，あいまいパラメーターを以下のように仮定する．ただし，ひびわれ密度は，その検査結果からなんらかの特性値への変換を実行することなしに直接主観的に健全度評価へ結び付けられている．したがって，ここでの特性値 y は，ひびわれ密度の検査結果 x に対して種々の主観的不確定性（$y=f(x)$, α, β, a, b）を考慮した情報として表わされるものと考える．つまり，特性値 y は検査結果 x と同じ尺度で定義され，$y=x$ となるものと考える．また，$y=x$ と置くことに関しても，y と x は同じひびわれ密度の集合上で定義されており，不確定性は存在しないと考えられるので，$\alpha=1$, $\beta=0$ とする．次に，a, b は，この場合，主に検査方法や検査精度に基づく不確定性の大きさを表わすと考えることができる．ひびわれ密度測定時の可視ひびわれには，床版の健全度に直接関係しないひびわれも含まれており，ひびわれ密度を過大評価する可能性を考えて，$a=15\%$, $b=5\%$ と仮定する．ひびわれ密度は，概略 0～10 m/m^2 の範囲の値をとることが経験的にわかっているので[11]，ここでは，$a=1.5$ m/m^2, $b=0.5$ m/m^2 とする．

次に，ファジー関係 $R2$ に関するパラメーター（$s=f(y)$, $r=g(y)$）の決定であるが，ひびわれ密度と健全度との関係は経験的に線形関係にあるとされ，しかもひびわれ密度の上限は約 8 m/m^2 と考えてよいため[11]，健全度 s が次式で与えられるものとする．

$$s=\begin{cases}1-y/8 & (0\leqq y\leqq 8)\\ 0 & (y\geqq 8)\end{cases} \qquad \cdots\cdots(21)$$

また，$r=g(y)$ については，健全度の良否が極端な場合には，目視によってでもかなり正確な評価が下せるが，損傷がある程度進行した状態では，目視による評価は信頼性に乏しいと考えられる．このようなひびわれ密度のもつ特性を考慮して，ファジー関係 $R2$ の不確定性の程度 r を，次式で表わすものとする．

$$r=\begin{cases}2\cdot\sin(y\pi/8) & (0\leqq y\leqq 8)\\ 0 & (y\geqq 8)\end{cases} \qquad \cdots\cdots(22)$$

以上のように，各判定因子に対して選定したパラメーターをまとめて表―1 に示す．

（2） 検査者による健全度評価

評価の対象は，著者ら[10]が過去に実橋載荷試験を行った薬師橋床版データ（5 パネル）を取り上げた．表―2 に，その測定結果を，従来法による健全度ランク[8]とともに示す．これら検査データに対して，表―1 に示したパラメーターを用いて，数値計算を行った結果を図―14 (a), (b) に示す．ただし，数値計算を行うにあたって，検査結果 x は，統計的なパラメーターが不明なため，$m=x$, $\sigma^2=0$ とした．また，ファジー関係 R は，連続的な関数として定義されているが，ここでは，検査結果，特性値および健全度の集合を，それぞれ 50 等分することにより，離散的に扱った．ただし，ひびわれ密度の検査結果および特性値の集合は，区間〔0, 8〕の実数空間上で定義し，その他の集合は，区間〔0, 1〕で定義している．図―14(a), (b) は，それぞれ，卓越振動数比およびひびわれ密度による健全度 S の評価結果であり，検査結果 x より得られる健全度 S は区間〔0, 1〕で任意の値，形状を取り得るという特性のみならず，後者に比べて前者による評価結果の方があいまいさが少ないという特徴をよく表現していることがわかる．このような特性をより明確にするため，薬師橋床版Ⅰ，Ⅲおよび Ⅱ に対する卓越振動数比の測定結果に注目する．薬師橋床版Ⅰ，Ⅲおよび Ⅱ の卓越振動数比は，それぞれ表―2 に示すように $x=0.80$, $x=0.79$ である．これは従来法[9]による評価では，表―2 に併記するようにそれぞれランク 3 (Medium)，ランク 2 (Low) と評価される．図―15 は，従来法の 5 段階評価におけるランク 3，ランク 2 に対応する帰属度関数およびこれより RC 床版の余寿命を，対数正規分布型の核によってファジー化したファジー関係を利用した帰属度関数として予測したもの[9]を，今回の数値計算で得られた結果と合わせて示したものである．これより，薬師橋床版Ⅰ，Ⅱ，Ⅲは，本来健全度がほとんど同程度であるにもかかわらず，従来法では判定基準に従う言語変数に変換することにより真の情報がゆがめられて伝えられる可能性があることがわかる．一

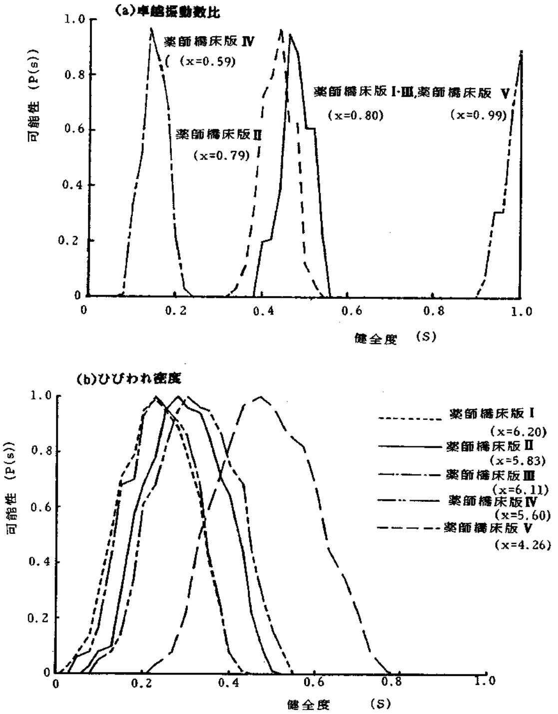
表―1 あいまいパラメーターの選定

パラメータ ＼ 判定因子	ファジー関係 R1					ファジー関係 R2	
	y=f(x)	α	β	a	b	s=f(y)	r=f(y)
卓越振動数比	$y=x^2$	1.0	0.05	0.05	0.05	$s=y^2$	r=0.05
ひびわれ密度	y=x	1.0	0.0	1.5	0.5	s=1-y/8	r=2・sin(yπ/8)

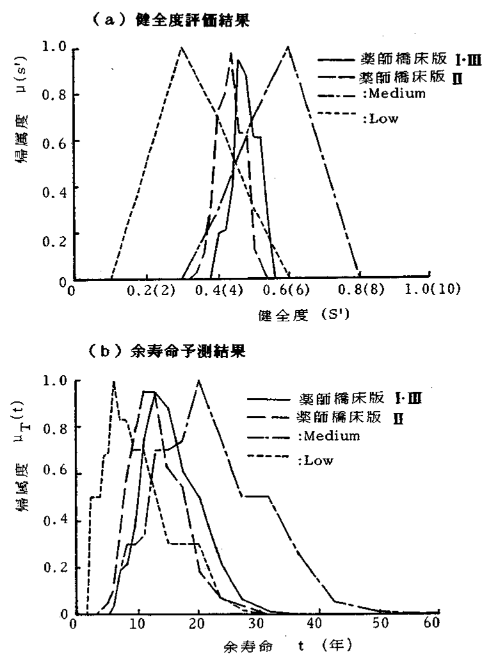
表―2 薬師橋床版の測定結果

床版No ＼ 判定因子	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
卓越振動数比 f_i/f_0	0.80 (3)	0.79 (2)	0.80 (3)	0.59 (1)	0.99 (5)
ひびわれ密度 (m/m^2)	6.20 (2)	5.83 (2)	6.11 (2)	5.60 (2)	4.26 (3)

注：（ ）内の数字は５段階の評価ランクを表す



図—14 健全度評価結果



図—15 従来法[9]との比較

方，本方法によると，検査結果が重視された形で健全度および余寿命が評価できるようになることがわかる．

(3) 上位階層者による健全度の修正

健全度評価結果に基づいて，構造物の管理者らが，補修，補強の要否あるいは荷重制限などの対策の最終的な決定を行う場合，先にも述べたように，検査者の経験の程度や性格などの精神的不確定性を考慮して，検査者による健全度評価報告を修正して理解する必要がある．本節では，2.(3) で提案した精神的不確定性に基づく修正法(図—10 参照)において，あいまいパラメーター λ_1, λ_2, λ_3 の変化により，修正後の評価値 E がどのように変化するかを，数値計算により確認する．

a) λ_1 による修正

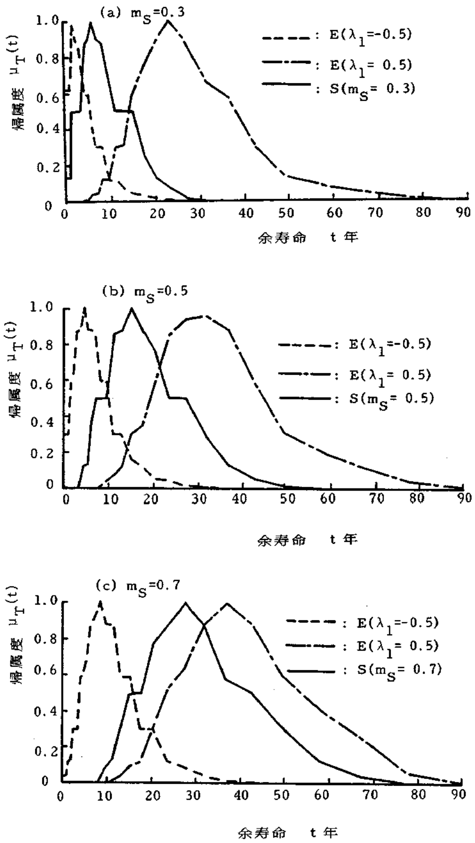
λ_1 は，健全度評価結果の確率論的平均値 m_S を修正するためのパラメーターであり，λ_1 による修正後の確率論的平均値 m_E は，式 (17) で与えられる．数値計算は，$m_S=0.3$, 0.5, 0.7 に対して，それぞれ $\lambda_1=-0.5$, 0.5 とした場合について計 6 ケース行った．計算結果として，図—16 に修正後の余寿命予測結果を，修正前のそれと比較して示す．また，それぞれの場合の m_E および余寿命予測分布のピーク値を表—3 に示す．これらより，パラメーター λ_1 が一定 (たとえば $\lambda_1=0.5$) の場合であっても，m_S の値により移動量が異なることがわかる．すなわち，S の評価が良否の極端な場合に，より極端な方向へ修正しようとするときその効果は小さく，逆に S の評価が中程度である場合や，良否が極端な場合に，これと逆の方向 (良→悪，悪→良) へ修正する場合にその効果は大きくなることを表わしている．これは，良否がはっきりしているときに，これをさらに極端な方向へ修正することは，補修，補強等の対策を立てるうえで，あまり意味がないということから考えて，矛盾はないと考えられる．

b) λ_2 による修正

λ_2 は，健全度評価結果の不確かさの程度，すなわち，確率論的な分散 σ_S^2 を修正するためのパラメーターであり，λ_2 による修正後の確率論的分散 σ_E^2 は，式 (18) により与えられる．数値計算は，$\sigma_S^2=0.017$ のときに，$\lambda_2=0.3$, 3 の 2 ケースについて行った．この場合の健全度および余寿命[9]の評価結果の変化を図—17 に示す．ま

表—3 λ_1 による m_E および余寿命の変化

m_S	σ_S^2	λ_1	m_E	σ_E^2	余寿命のピーク値 (年)
0.3	0.009	-0.5	0.15	0.009	2.12
		0.0	0.30		6.05
		0.5	0.65		23.34
0.5		-0.5	0.25		4.48
		0.0	0.50		14.88
		0.5	0.75		31.50
0.7		-0.5	0.35		8.17
		0.0	0.70		27.11
		0.5	0.85		36.00



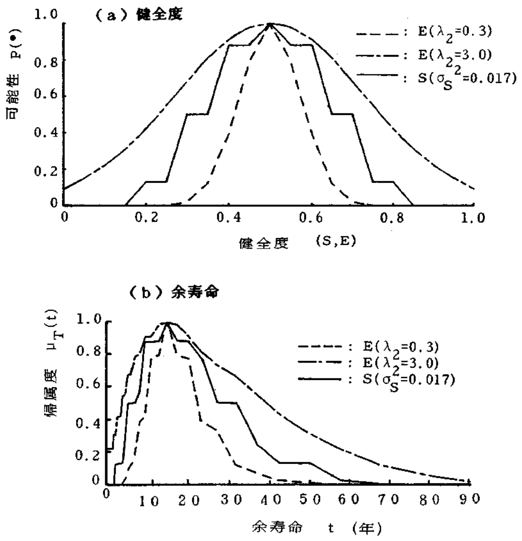
図—16 λ_1による余寿命の変化

た，λ_2は，$0<\lambda_2<\infty$の区間で決定され，$\lambda_2=0$のとき，不確定性が存在しないように修正され，$\lambda_2=\infty$のとき，不確かさは最大となり，評価結果は情報として意味のないものとなる．

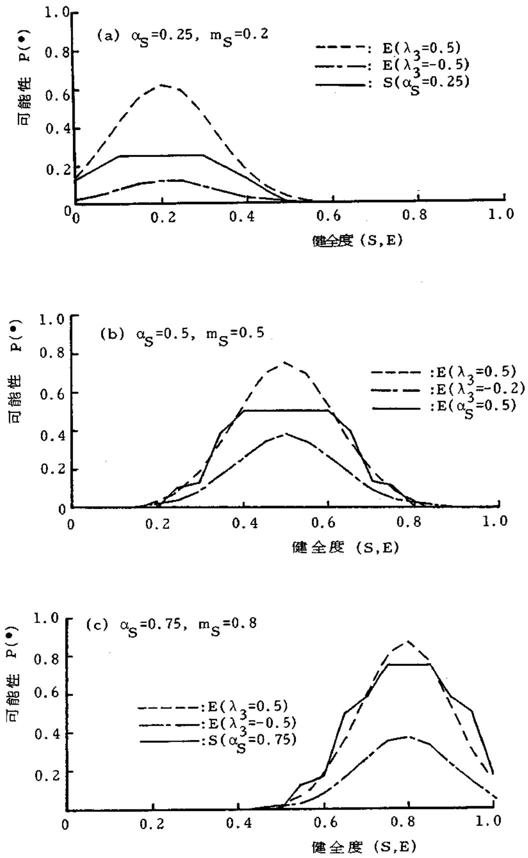
c）λ_3による修正

λ_3は，健全度評価結果に対する，主に信頼度を修正するためのパラメーターであり，修正後のピーク値α_Eは，式（19）より与えられる．計算結果の一例を健全度について示すと図—18のようになる．これより，λ_3による効果は，λ_1による修正の場合と同様に，$\alpha_S>0.5$かつ$\lambda_3<0$の場合，および$\alpha_S<0.5$かつ$\lambda_3>0$の場合に，その効果（ピーク値の変動）は大きくなる特性を有することがわかる．

以上，精神的不確定性に基づくパラメーターλ_1，λ_2，λ_3の有する特性を，数値計算により把握することを試みた．現時点では，これらのパラメーターを決定し，実際に健全度診断を行うには至っていないが，今後これらのパラメーターを合理的に選定するために，アンケート調査や事例調査等により，専門家や権威者の知識を収集，整理することが必要であると考えられる．



図—17 λ_2による健全度および余寿命の変化



図—18 λ_3による健全度の変化

4. 結　論

本研究は，構造物の健全度診断に関与する主観的不確

定性に注目し，これらの取り扱いについて検討を行ったものである．すなわち，検査結果から健全度診断を行うプロセスにおける主観的不確定性を認めたうえで，これらを積極的に取り入れ，ファジー集合論における主観的不確定性の数学的表現方法である帰属度関数の，より現実的かつ合理的な決定を試み，さらに，これらを用いた診断手法を提案した．

以下に本研究の結果を要約する．

（1） 種々の主観的不確定性を，より多く考慮するための手法として，帰属度関数を二次元空間のファジー集合上で考え，客観的データと健全度との関係を表わすファジー関係を，**Π** 関数を用いて定義することを試みた．その結果，次のことが本手法の特徴として挙げられる．

① 従来より行ってきた言語変数により一義的に決定される帰属度関数による評価法と比較して，工学的意味を有するパラメーターで帰属度関数を制御することにより，より現実的で柔軟な健全度評価が可能となった．

② 不確定性の大きさを表わすパラメーターを自由に決定できることにより，主観的不確定性が存在しない場合についても，ファジー集合論の特殊な場合として，同様の評価が可能である．

③ ファジー事象の確率の概念を適用することにより，客観データに基づく主観的評価が可能となった．

（2） 検査者による評価結果に対して，技術的不確定性のみならず精神的不確定性をも考慮することにより，診断過程に含まれる主観的あいまいさの工学的取り扱いが可能となり，より真の健全度に近い評価が可能となるものと考えられる．

本研究では，ある判定因子についての検査結果から健全度評価を行う手法について提案したが，今後，これらの手法の実用化を目指すうえで，次のような課題が残されているといえる．

① 複数の判定因子に対する検査結果から総合的評価を下すための手法の開発，

② 精神的不確定性に関するパラメーターの決定法，

③ 最終的に得られる健全度評価結果の解釈の仕方を含む，補修，補強等の対策の決定法，等

が挙げられる．また，健全度診断の真の目的が構造物の状態を正確に把握することであることを考えれば，今後，検査技術や解析技術の向上等，不確定性を小さくする努力が必要なことはいうまでもない．

参考文献

1) Brown, C. B.：A Fuzzy Safety Measure, Proc. of ASCE, EM 5, pp. 855～872, 1979. 10.

2) 白石成人・古田 均・池島賢治：信頼性解析へのファジイ理論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 325 号，pp. 1～10, 1982. 9.

3) Zadeh, L. A.：Fuzzy Sets Information and Control, Vol. 8, pp. 338～353, 1965.

4) Zadeh, L. A.：Probability Measures of Fuzzy Events, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 23, pp. 421～427, 1968.

5) Negoita, C. V.・浅居喜代治：あいまいシステム理論入門，オーム社，pp. 9～38, 1978. 2.

6) 西村 昭・宮本文穂・長谷川敏之：構造健全度診断におけるファジー集合論の適用，土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，1983. 10.

7) 水本雅晴：最近の Fuzzy 集合理論，数理科学，No. 191, pp. 15～20, 1975. 5.

8) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂：道路橋 RC 床版の健全度判定法に関する研究，既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度，耐久性の判定に関するシンポジウム論文集，土木学会関西支部，pp. 99～106, 1983. 2.

9) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂：道路橋 RC 床版の診断と評価に関する基礎的研究，材料，Vol. 34, No. 376, pp. 40～46, 1985. 1.

10) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・山本晃久・斉藤 功：現場試験を経た損傷床版の比較室内試験について，土木学会関西支部年次学術講演概要集，1982. 6.

11) 建設省近畿地方建設局：RC 床版の損傷に関する実験報告書（その 2），1976. 6.

12) Nishimura, A., Fujii, M. and Miyamoto, A.：Diagnosis of Reinforced Concrete Slabs for Highway Bridges, Memoirs of Faculty of Engineering, Kobe University, 1983. 9.

（1986. 6. 23・受付）