

## ファジィ理論を用いた水道管の耐久性評価手法

## A COMPREHENSIVE APPROACH TO EVALUATING THE DURABILITY OF WATER SUPPLY PIPES USING FUZZY SETS THEORY

山田健太郎\*・馬 智 亮\*\*・岡田隆彦\*\*\*・島田 静雄\*\*\*\*

By Kentaro YAMADA, MA Zhiliang, Takahiko OKADA and Shizuo SHIMADA

This study aimed at developing an effective approach to evaluating the durability of existing water supply pipes. The influential factors were clarified and classified into two groups, i.e. general factors and corrosion environment factors. Then, an approach using fuzzy sets theory was proposed to combine the evaluations on each group of factors. In the approach, the general factors are evaluated using an existing statistical model and the corrosion environment ones using experts' knowledge. A small number of field surveys of water supply pipes are required to be carried out for the combination of evaluations. The approach was used to establish an evaluation model for the cast iron pipes in Nagoya City and the model showed higher accuracy than the statistical model.

Keywords : pipeline, durability, corrosion, statistical model, fuzzy sets theory

## 1. ま え が き

地中に埋設される水道管路の老朽化は、水質の低下ばかりでなく、漏水や破裂といった水道管の破損事故をも引き起こす。水道の安定供給を確保するためには、老朽化した管路を効率的に更正・更新することが必要である。

名古屋市の水道管路は75年以上にわたって埋設されてきた。この間、技術の進歩とともに、管の材質や、継手の種類、設計基準、施工方法などに改善が加わった。材質を例にとると、鉄管では、当初用いられた普通鑄鉄管が1930年代には高級鑄鉄管へ、1950年代以後はグクスタイル鑄鉄管へと代えられてきており、現在では、十分な強度と靱性をもった管が使用されている<sup>1)</sup>。しかしながら、市内には古い材質の管がまだ数多く埋設されており、効率的な更新を行うために、老朽化した管路の耐久性を合理的に評価することが重要である。老朽化の

程度や耐久性を評価するには、管路を掘り出して強度や腐食の度合を科学的に調べるのが望ましい。しかし水道使用者に与える影響や費用の面から、すべての管路をこの方法で評価するのは不可能に近い。そこで、一般には、管種、口径、土被り、経年数などのパラメーター(以下一般的因子という)によって、管路の耐久性を推定している<sup>2),3)</sup>。

わが国では、厚生省が「水道管路更新システム調査委員会」を作り、昭和58年から3か年にわたって、全国の19水道事業者から管路のデータを集め、統計的な水道管路の耐久性推定モデルを多数作成した<sup>3)</sup>。これらのモデルは数多くのデータをもとに作成されており、条件によっては精度の高いものであるが、腐食環境の影響は考慮されていない。腐食が老朽化の主要な原因なので、腐食環境を含めたモデルの構築が必要と考えられる。

そこで、本研究では、まず管路の埋設環境について調べ、管路の耐久性に及ぼす腐食環境の要因(以下腐食環境因子という)を整理した。次に、一般的因子の影響は厚生省のモデルの1つ(モデル4-7)で評価し、腐食環境因子による影響は専門家の知識を用いて評価することとした。両方の評価を、管路専門家による現場調査の結果から得られた関係によって結合する。この過程において、ファジィ理論を用いた。さらに、本手法を用いて、名古屋市にある高級鑄鉄管路の耐久性推定モデルを作成

\* 正会員 Ph.D. 名古屋大学教授 工学部土木工学科  
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\* 学生会員 工修 名古屋大学大学院生 工学部土木工学科(同上)

\*\*\* 正会員 名古屋市水道局配水課  
(〒460-08 名古屋市中区三の丸3-1-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科  
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

した。

本手法の特徴は、次のようにまとめることができる。

1) 本手法は、管路の耐久性に影響する一般的因子に腐食環境因子を加味した推定手法である。腐食環境因子については、マイクロセルだけでなく、マクロセル腐食および電食に関する因子も考慮した。

2) 管路の耐久性推定モデルを作成するときには、水道管路の腐食に関する専門家の知識を利用する。このため少数の管路専門家による現場調査が必要となるが、統計的な推定モデルを構築する場合に必要な多数の記録や調査データは不要である。

3) ファジィ理論の使用によって、専門家の知識を言語で集める。専門家の知識には経験的なものが多いため、言語で収集した方が数字に偏りのない、より合理的な方法になると思われる。

4) 腐食環境の影響を考慮に入れることができる。腐食環境因子をガイドラインによって言語で評価するので、土壌の化学分析を必要としない。

## 2. 腐食環境因子の評価

水道管の腐食は電気化学反応であり、その反応原理および腐食形態によって、主にマイクロセル腐食、マクロセル腐食および電食の3種類に分けられる<sup>7)</sup>。原理的には、マイクロセル腐食もマクロセル腐食も電池作用によるものである。ただし、前者は表面の均一な腐食であり、後者は表面の不均一な腐食、たとえばピッチング(孔食)が生じる腐食である。電食は電気分解によるもので、一般にピッチングを生じる。

水道管の外面腐食は、土壌の腐食性すなわちマイクロセル腐食だけでなく、場合によってはマクロセル腐食を考慮しなくてはならない<sup>9)</sup>。また、水道管が防食措置されている場合には、その防食効果を考慮しなくてはならない。そこで、主に朝倉らの研究<sup>7)</sup>を参考に、腐食環境の構図をまとめた。これを Fig. 1 に示す。因子である土壌の通気差、迷走電流、異種金属による腐食性、「コンクリー

ト・土壌」腐食性は、朝倉らの論文<sup>7)</sup>を参照されたい。その他の因子については以下に説明する。

土壌のマイクロセル腐食性：アメリカの国家規格 (ANSI)<sup>9)</sup>に示される土壌腐食性評価法で評価する。管路延長の平均的土壌の腐食性である。本研究では、後述するように、水道管の専門家によって土壌の色、含水状況などから、土壌のおよそのマイクロセル腐食性を評価する。

埋め戻し土の不均一性：最近は水道管を埋設するとき、山砂を埋め戻し土として使うが、以前には掘り出した土(在来土)を埋め戻し土として使っていた。在来土は、山砂より一般に不均一であり、マクロセル腐食性が大きい。

電気的防食の良否：ここでは「コンクリート・土壌」腐食に対する電気的防食措置の良否を意味する。水道管は、管内水圧により曲管やT字管等の異形管が移動するのを防止するため、コンクリートで異形管部を巻く防護措置がとられている<sup>10)</sup>。それによる「コンクリート・土壌」腐食を防止するため、大口径管では、電気的防食措置、たとえば、陽極防食がとられることがよくある。

マイクロセル・マクロセル防食の良否：ここでは管体の外面に施された塗覆装措置の良否を意味する。

水道水の腐食性：これまでに、水道水のpH、残留塩素の濃度、塩化物イオンおよび硫酸イオンの濃度、流速、水温などが管内面の腐食に影響すると指摘されている<sup>2)11)</sup>。ここでは水道水の腐食性はこれらの因子をすべて含んだものとする。

内面防食の良否：水道管の内面防食措置(たとえばモルタルライニングやエポキシライニング)の有無およびその品質を評価する必要がある。また、供用途中で防食措置がとられたものもあるので、この因子は、内面防食措置のとられた時期とその良否の両者を考慮する。

本研究では、各腐食環境因子に対して、専門家の評価方法を「腐食環境評価ガイドライン(案)」にまとめた。したがって、一般の評価者が腐食環境因子を評価する場合には、このガイドラインに従って評価することとする。

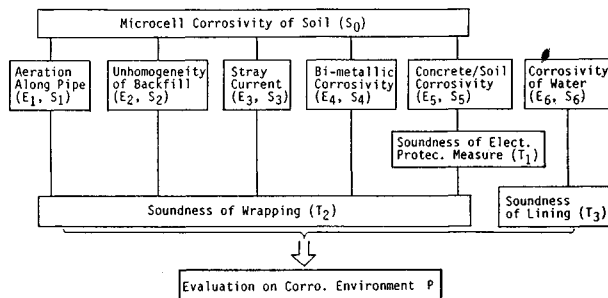


Fig. 1 Evaluation Model of Corrosion Environment.

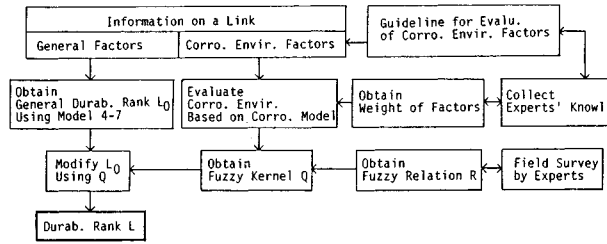


Fig. 2 Flow Chart of the Approach

3. ファジィ理論を用いた推定手法

Fig. 2 に本推定手法の流れを示す。この手法を用いてある管種の水道路管の耐久性推定モデルを作成するには、次の3つのステップで行う。まず、該当地域の腐食環境の評価ガイドラインを作成する。次に、各因子の相対的影響度に関する専門家の知識を収集する。最後に、専門家による現場調査から、ファジィ条件を確立する。

(1) 一般的因子の影響評価

一般的因子による管路の耐久性推定ランク  $L_0$  を厚生省モデル4-7で求める。

厚生省モデル4-7は、管路ごとに過去3年「事故有」と「事故無」を外的基準として、「事故有」と「事故無」のデータを同数にして、912件のデータをもとに、数量化理論II類で作られたものであり、912件の管路の推定に71.2%という高い得中率（「事故有」と「事故無」を正しく推定した管路の割合）を示した<sup>3)</sup>。このモデルをFig. 3

に示す。一管路に対して、推定結果がサンプルスコアの形で表現される。サンプルスコアが低いほど一般に管路の老朽化程度が大きいという傾向を用いて、管路の耐久性ランク付けが可能となる（たとえば、全管路において老朽化程度順に上位5%に入る管路の耐久性をランク1とする）。

(2) 腐食環境因子の影響評価

腐食環境因子の影響評価に用いる各変数をTable 1に示す。因子の影響度  $E_1 \sim E_6$  は、土壌のマイクロセル腐食性を一定とした場合の、各因子間の腐食に対する相対的影響度である。各因子の影響度は管種（たとえば高級铸铁管がダクタイル铸铁管）によって異なるが、同一の管種に対しては、時間とともに変化がないと仮定する。

水道路管の維持・管理の現場に長期間関わってきた人たちのうち、水道管の破損について高度な知識をもっている人（いわゆる専門家）がいると思われる。ただし、このような知識は直感に基づいたものが多いため、因子

Item	Category	Score	Range	Accident	No accident
Pipe material	CIP-SO	-0.2717	2.5211	—	—
	CIP-M	0.2683		—	—
	.....	.....		—	—
Diameter (mm)	50~70	-0.2835	0.9010	—	—
	100~150	-0.0800		—	—
	200~300	0.4778		—	—
	400 or larger	0.6175		—	—
Earth covering (m)	0.9 or smaller	-0.1728	0.2135	—	—
	1.0 or larger	0.0407		—	—
Traffic of large vehicle	None	0.1270	0.7274	—	—
	Light	-0.1214		—	—
	Heavy	-0.6004		—	—
Max. hydraulic pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	0~2.0	0.6087	1.1535	—	—
	2.1~6.0	0.0459		—	—
	6.1 or higher	-0.5448		—	—
Lapse (years)	40 or larger	-0.1612	0.7368	—	—
	30~39	-0.4240		—	—
	20~29	-0.0265		—	—
	10~19	0.3128		—	—

Note. CIP indicates cast iron pipe. SO and M indicate socket joint and mechanical joint respectively.

Fig. 3 Model 4-7.

Table 1 Corrosion Environment Factors.

No.	Factors	Weight	Size
1	Aeration Difference along Pipe	$E_1$	$S_1$
2	Unhomogeneity of Backfill	$E_2$	$S_2$
3	Stray Current	$E_3$	$S_3$
4	Bi-metallic Corrosivity	$E_4$	$S_4$
5	Concrete/Soil Corrosivity	$E_5$	$S_5$
6	Corrosivity of Water	$E_6$	$S_6$
7	Corrosivity of Soil	/	$S_0$
8	Soundness of Electrical Corrosion Protection Measure	/	$T_1$
9	Soundness of Wrapping	/	$T_2$
10	Soundness of Lining	/	$T_3$

の影響度は専門家から言語で収集し、ファジィ集合で表示することとする。

因子のサイズ  $S_0 \sim S_6$  は、評価しようとする因子の状況が、通常その因子があり得る範囲内のどの位置にあるかを示すものとする。たとえば、迷走電流の度合  $S_3$  は、場合によって「非常に大きい」や「普通」等の言葉で評価できる。因子のサイズ  $T_1 \sim T_3$  は評価しようとする防食措置の良否を示すものとする。たとえば、内面防食の良否  $T_3$  は、場合によって「よい」や「余りよくない」等の言葉で評価できる。すべての因子のサイズは、管路を掘り出すことなく、評価者がその管路の状況を調べて、ガイドラインから言語で与えるものである。計算においてはこれらの言語をファジィ集合に対応させる。

因子 8～10 の影響度を変数としなかったのは、各防食措置の良否についての評価に、それぞれの影響度がすでに考慮されていると考えられるからである。また、因子 7 の影響度を考慮しないことの影響は、後述のファジィ関係によって考慮する。

腐食環境因子の影響評価は、すでに示した腐食環境の構図をもとに、ファジィ集合の演算を用いて行う。

管路の外表面腐食環境に対する評価  $P_a$  は以下のように求める。

$$\begin{aligned}
 P_a &= (\neg T_2) \cap \left\{ \bigcup_{i=1}^4 (S_i \cap E_i) \right\} \cup \\
 & \quad [S_5 \cap E_5 \cap (\neg T_1)] \cap S_0 \dots\dots\dots (1) \\
 \Leftrightarrow \mu_{P_a}(x) &= (1 - \mu_{T_2}(x)) \wedge \left\{ \bigvee_{i=1}^4 (\mu_{S_i}(x) \wedge \mu_{E_i}(x)) \right\} \vee \\
 & \quad [\mu_{S_5}(x) \wedge \mu_{E_5}(x) \wedge (1 - \mu_{T_1}(x))] \wedge \mu_{S_0}(x) \\
 & \dots\dots\dots (1 \cdot a)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\neg$  は補集合、 $\cap$  は共通集合、 $\cup$  は和集合を表す。式(1・a)は式(1)のメンバーシップ表示である。 $\vee$  は max、 $\wedge$  は min を表わし、変数  $x$  は 0, 0.1, …, 1 の間で変化するとする。

管路の内表面腐食環境に対する評価  $P_b$  は以下のように

求める。

$$\begin{aligned}
 P_b &= E_6 \cap S_6 \cap (\neg T_3) \dots\dots\dots (2) \\
 \Leftrightarrow \mu_{P_b}(x) &= \mu_{E_6}(x) \wedge \mu_{S_6}(x) \wedge (1 - \mu_{T_3}(x)) \dots\dots (2 \cdot a)
 \end{aligned}$$

式(1)と式(2)は、ある因子の腐食に及ぼす影響はその因子のサイズと影響度、および対応する防食措置の良否のサイズの補集合の共通集合で評価され、また、いくつかの因子の影響は、各因子の影響の和集合で評価されることを意味する。また、ここで示した共通集合と和集合の役割は、通常集合における積と和に似ていると考えてよい。

全体の腐食環境の評価  $P$  は  $P_a$  と  $P_b$  の確率的な和集合とする。よく使われるファジィ集合の和集合では、式(1)に示した和集合、確率的な和集合のほか、限界和集合がある。確率的和集合は、他の2種類の間値となる<sup>18)</sup>。また、これでむすぶ集合のいずれかに起こる変化が和集合に反映でき、これを採用した。

$$\begin{aligned}
 P &= P_a \oplus P_b \dots\dots\dots (3) \\
 \Leftrightarrow \mu_P(x) &= \mu_{P_a}(x) + \mu_{P_b}(x) - \mu_{P_a}(x) \cdot \mu_{P_b}(x) \dots\dots (3 \cdot a)
 \end{aligned}$$

(3) 一般的因子と腐食環境因子との影響評価の結合

厚生省モデル4-7での評価結果  $L_0$  に腐食環境の評価  $P$  を組み合わせるのはファジィ条件によって行う。

ファジィ条件とは、腐食環境の評価  $P$  から、 $L_0$  を修正するファジィ KERNEL  $Q$  までの関係である。 $Q$  が大きいほど  $L_0$  を大きく修正する。ファジィ条件は以下のような意味を表わす。

- 「もし  $P$  が非常に大きいなら、 $Q$  が大きい；
- もし  $P$  が普通であるなら、 $Q$  が普通である；
- もし  $P$  が非常に小さいなら、 $Q$  が小さい。」

ここに  $Q$  は次のような形を取り、各意味(小さい、大きいなど)をもつ  $Q$  はあらかじめ定義され、調整することができる。

$$Q = a_1/L_0 + a_2/(L_0 - 1) + a_3/(L_0 - 2) + a_4/(L_0 - 3)$$

ファジィ関係の具体的な意味は、管路専門家による少ない件数の耐久性状態の評価結果から、管路ごとに耐久性ランクに対して、モデルによる推定と専門家の評価がよく合致するように「試行錯誤」の方法で決められる。

ここで、この場合の「非常に大きい」、「普通」、「非常に小さい」に対して、それぞれ  $i=1, 2, 3$  を対応させると、ファジィ関係  $R$  は次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 R &= \bigcup_{i=1}^3 (P_i \cap Q_i) \dots\dots\dots (4) \\
 \Leftrightarrow \mu_R(x, y) &= \bigvee_{i=1}^3 (\mu_{P_i}(x) \wedge \mu_{Q_i}(y)) \dots\dots\dots (4 \cdot a)
 \end{aligned}$$

両評価結果を合わせるのは、腐食環境の評価  $P$  とファジィ関係  $R$  のファジィ合成を求めることによって行う。推定ランク  $L$  はファジィ合成の結果を重心法<sup>20)</sup>によって非ファジィ化したものとする。非ファジィ化の方法は

ほかにもあるが、ここでは試行錯誤によって、重心法を用いることにした。

$$L = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (L_0 - i + 1) \cdot \mu_Q(L_0 - i + 1)}{\sum_{i=1}^m \mu_Q(L_0 - i + 1)} \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $m$  は  $L_0$  が 4 未満のときは、 $m=L_0$ ;  $L_0$  が 4 以上のときは  $m=4$ 。  $Q$  は

$$Q = P \circ R \dots\dots\dots (6)$$

$$\Leftrightarrow \mu_Q(x) = \max_y \{ \mu_P(x) \wedge \mu_R(x, y) \} \dots\dots\dots (6 \cdot a)$$

#### 4. 高級鉄管の耐久性推定モデルの作成

##### (1) 腐食環境の評価ガイドラインの作成

腐食環境評価ガイドラインは各腐食環境因子のサイズの評価方法を示すものである。これにより、専門家の評価方法をある程度統一するとともに、専門家だけでなく、水道管工事の現場経験のある人ならば、専門家とほとんど同じ評価結果を出すようにする。

本研究で作成した「腐食環境の評価ガイドライン(案)」は、主に朝倉らの論文<sup>7)</sup>を参考にして、専門家と討議して作成したものである。このガイドラインでは、各因子のサイズの評価に次の言語を使う。

$S_0 \sim S_6$  に対しては、

- ・該当腐食性がないと思う (TR) ・非常に小さい (VS)
- ・やや小さい (FS) ・普通 (ME)
- ・やや大きい (FL) ・非常に大きい (VL)

$T_1 \sim T_3$  に対しては、

- ・該当腐食措置が取られていない (TR)

- ・よくない (B) ・余りよくない (FB)
- ・普通 (OR) ・すこしよい (FG) ・よい (G)

を使う。本研究で採用したこれらの言語のメンバーシップ関数は Appendix 1 に示す。

「腐食環境の評価ガイドライン(案)」の内容については、Appendix 2 に迷走電流のサイズの評価方法を例として示す。

##### (2) 因子の影響度についての専門家の知識の収集

本研究で専門家としたのは、名古屋市水道局の係長クラスの技術者 11 人である。この人達は水道管の現場経験が豊富で、水道管の腐食評価に対して高度な知識を持っていると思われる。その 11 人の現場経験の状況を Table 2 に示す。そのうち、\*印をつけた 9 人は影響度の評価、\$印をつけた 5 人は現場調査に参加した。これら専門家の知識の収集は次のように行った。

1) まず各因子を影響度の大きい順に配列してもらい、次に、それぞれの影響度を言語で評価してもらった。順序を付けた方が、それをしないで影響度を評価することに比べて、影響度をより適切に評価できるとと思われる。

2) ある因子に対する専門家達の評価をそれぞれのメンバーシップ関数に対応させ、サポートごとに通常平均値を取って、ファジィ集合の平均値を求め、得られたファジィ集合を専門家の平均的評価とした。さらに、このファジィ集合のメンバーシップ関数を、任意の中間サポート値のメンバーシップが隣のサポート値のものより大きいか等しいように凸状化した。これで得られたファジィ集合をこの因子の影響度とした。

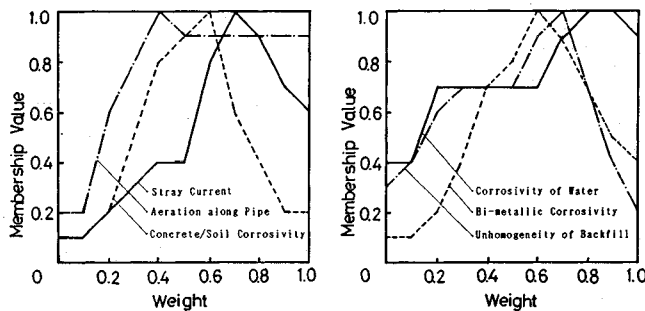


Fig. 4 Weight of Factors.

Table 2 Experts' Experience.

Experts' No.	1*	2*	3*	4**	5*	6**	7*	8*	9*	10*	11*
Years in Bureau	29.0	23.0	23.0	32.0	29.0	29.0	21.0	10.0	27.0	37.0	35.0
Years in field (Among in Bureau)	7.0	10.5	15.0	22.0	13.0	12.0	8.0	2.0	5.0	24.0	22.5

Note. \*attended evaluation of weight \$ attended field survey

Table 3 Durability Rank.

Rank	Definition	Percentage in Length*	Sample Score Range in Model 4-7
1	should be replaced immediately	0.62	less than -1.31
2	should be replaced as soon as possible	6.20	~ -0.98
3	should be replaced in several years	9.09	~-0.85
4	no need to be replaced in several years	12.71	~-0.74
5	can be dealt with as brand new pipes	71.38	more than -0.74

\*Percentage of the length of pipe links in a certain rank in the total length of pipe links considered

Table 4 Fuzzy Relation for Cast Iron Pipes.

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
n	1	1	0.7	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2
n-1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.2
n-2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.7	0.8	0.8	0.4	0.2
n-3	0	0	0.1	0.3	0.5	0.5	0.7	1	0.8	0.4	0.2

専門家から収集した各因子の影響度を Fig. 4 に示す。具体的な数値は Appendix 3 のとおりである。メンバーシップ関数を凸状にしたのは、各因子の影響度の意味をはっきりさせるためである。Fig. 4 において、メンバーシップ関数の値 1.0 に対応するものを並べてみると、各因子の影響度が大きいのは、水道水の腐食性、迷走電流、埋め戻し土の不均一性、異種金属による腐食性、「コンクリート・土壌」腐食性、土壌の通気差の順になっている。各因子の影響度評価におけるあいまいさ、すなわち影響評価の困難さは、土壌の通気差が一番大きく、次に水道水の腐食性、迷走電流が一番小さい。このあいまいさは、主に管路の腐食に対する知識の不足に起因する。また、各因子の概念に対する専門家の認識の差が大きく、そのあいまいさの要因となる。通常集合の手法によって、このあいまいさを問題解決の最初の段階で非あいまい化するの是一般的である。しかし、本手法では、このあいまいさを問題解決の最後の段階で非あいまい化する。必ずしも最後の段階で結果を非あいまい化する必要がないが、非あいまい化によって、従来どおりの形の結果ができる。これによって、ファジィ集合の概念にあまりなれていない人もこの推定結果を使うことができる。

(3) ファジィ条件の確立

本研究では、名古屋市水道局の管路更新の実情からみて、Table 3 に示す耐久性のランクを定義した。また、この定義によって、モデル 4-7 において、各推定ランクに対応するサンプルスコアの範囲を推測して、Table 3 に示す。

本モデルのファジィ条件をたてるため、腐食環境が異なると思われる 14 か所の水道管路更新の現場調査を行った。この調査では、現場で管体を掘り出す前に、ま

ず専門家が「腐食評価ガイドライン(案)」に従って、腐食環境因子のサイズを評価した。次に、管体を掘り出して、管体の状況と周囲の環境に注目し、管路の耐久性ランクを評価した。専門家の評価の平均値を評価結果として、ファジィ条件を次のように求めた。

1) ファジィ KERNEL Q の意味は次のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{small } Q(n) &= 1/n + 0.5/(n-1) + 0.2/(n-2) \\ \text{medium } Q(n) &= 0.5/n + 0.5/(n-1) + 0.5/(n-2) \\ &\quad + 0.5/(n-3) \\ \text{large } Q(n) &= 0.2/n + 0.6/(n-1) + 0.8/(n-2) \\ &\quad + 1/(n-3) \end{aligned}$$

これはモデルの作成者によって定義し、調整することもできる。

2) おのおのの管路に対して、式(1)~(3)によって腐食に対する評価 P を求める。

3) 厚生省のモデルによる各管路の推定ランク  $L_0$  を求め、それと専門家による評価ランクとの差を求める。

4) P の値と両評価ランクの差の関係を調べ、いくつかのファジィ条件の意味を設定し、それぞれについて、式(4)によってファジィ条件を求め、後述の(5)の推定例で示した計算を行う。

5) 各ファジィ条件による推定結果を専門家の評価と比べ、専門家の評価結果と最も近づくようなファジィ条件を本モデルのファジィ条件とする。

このように求めたファジィ条件を Table 4 に表わし、以下の意味に対応する。

「もし P が非常に小さいなら、Q が small である；もし P が普通であるなら、Q が medium である；もし P がやや大きいなら、Q が large である。」



Table 7 Computation of P.

	Membership Value											Note
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
S <sub>1</sub> E <sub>1</sub> P <sub>1</sub> =S <sub>1</sub> ∩E <sub>1</sub>	0.2	0.3	0.9	1	0.8	0.2	0.1	0	0	0	0	FS
S <sub>2</sub> E <sub>2</sub> P <sub>2</sub> =S <sub>2</sub> ∩E <sub>2</sub>	0.2	0.3	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9	1	0.7	0.4	0.2	FS
S <sub>3</sub> E <sub>3</sub> P <sub>3</sub> =S <sub>3</sub> ∩E <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TR
S <sub>4</sub> E <sub>4</sub> P <sub>4</sub> =S <sub>4</sub> ∩E <sub>4</sub>	1	1	0.7	0.3	0.1	0	0	0	0	0	0	VS
S <sub>5</sub> E <sub>5</sub> ¬T <sub>1</sub> P <sub>5</sub> =S <sub>5</sub> ∩E <sub>5</sub> ∩(¬T <sub>1</sub> )	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.8	1	0.9	0.7	0.6	¬TR
S <sub>7</sub> P <sub>7</sub> =S <sub>7</sub> ∩(∪P <sub>i</sub> )	0	0	0.1	0.3	0.8	1	0.9	0.3	0.1	0	0	M
¬T <sub>2</sub> P <sub>8</sub> =P <sub>8</sub> ∩(¬T <sub>2</sub> )	0	0	0.1	0.3	0.8	0.2	0.1	0	0	0	0	¬B
S <sub>6</sub> E <sub>6</sub> ¬T <sub>3</sub> P <sub>6</sub> =S <sub>6</sub> ∩E <sub>6</sub> ∩(¬T <sub>3</sub> )	0.2	0.3	0.9	1	0.8	0.2	0.1	0	0	0	0	FS
P <sub>9</sub> =P <sub>9</sub> ∩P <sub>9</sub>	0.2	0.3	0.7	0.7	0.2	0	0.1	0	0	0	0	¬OR
P <sub>9</sub> ⊕P <sub>9</sub>	0.2	0.3	0.7	0.8	0.8	0.2	0.2	0	0	0	0	

に加えることができるため、より総合的に管路の耐久性評価を行うことができる。

(3) この手法で作成した名古屋市の高級鑄鉄管路の推定モデルは、腐食環境を考慮していない従来の統計的な推定モデルよりも専門家の評価とよく適合することがわかり、水道管の耐久性推定に適用できると思われる。

謝 辞：本論文は、昭和 63 年度名古屋市水道局より委託された「管路診断手法に関する調査研究」に基づいて行った研究の成果をまとめたものであり、水道局の各配水事務所には多大な協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

Appendix 1 言葉のメンバーシップ関数

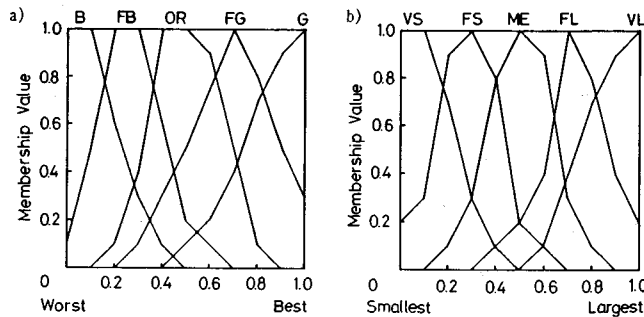


Fig. A-1 Membership Function of Evaluation Vocabulary.



## Appendix 2 迷走電流のサイズの評価方法

### □ 注目すべき点

- ・近くに直流電気鉄道があるかないか
- ・近くに大きな電解工場や溶接工場があるかないか
- ・近くに他の施設の外部電源および強制排流などの防電食措置があるかないか

### □ 傾向

- ・距離が近いほど迷走電流が大きい
- ・直流電気鉄道の電圧が大きいほど迷走電流が大きい
- ・電解や溶接工場が大きいほど迷走電流が大きい
- ・防電食電流が大きいほど迷走電流が大きい

### □ 評価方法および評価例

直流電気鉄道による迷走電流の評価

日本にある直流電気鉄道の電圧は、600 V から 1 500 V までである。

まず、直流電気鉄道による迷走電流の状態の変化範囲を想定する。最大迷走電流の状態は、電圧が 1 500 V で水道管とその電気鉄道の距離は 10 m 以内である状態に当たると考えられ、最小迷走電流の状態は、電圧が 600 V で距離が 300 m である状態に当たると考えられる。

たとえば、評価しようとするのは電圧 800 V、距離 100 m の状態とする。その変化範囲における位置を感じるままに評価言葉で評価すると、「普通」という評価が考えられる。

## Appendix 3 因子の影響度のメンバーシップ関数

土壌の通気差

$$0.2/0+0.2/0.1+0.6/0.2+0.8/0.3+1/0.4$$

$$+0.9/0.5+0.9/0.5+0.9/0.7+0.9/0.8$$

$$+0.9/0.9+0.9/1$$

埋め戻し土の不均一性

$$0.3/0+0.4/0.1+0.6/0.2+0.7/0.3+0.7/0.4$$

$$+0.7/0.5+0.9/0.6+1/0.7+0.7/0.8+0.4/0.9$$

$$+0.2/1$$

迷走電流

$$0.1/0+0.1/0.1+0.2/0.2+0.3/0.3+0.4/0.4$$

$$+0.4/0.5+0.8/0.6+1/0.7+0.9/0.8+0.7/0.9$$

$$+0.6/1$$

異種金属による腐食性

$$0.1/0+0.1/0.1+0.2/0.2+0.4/0.3+0.7/0.4$$

$$+0.8/0.5+1/0.6+0.9/0.7+0.7/0.8+0.5/0.9$$

$$+0.4/1$$

「コンクリート・土壌」腐食性

$$0.1/0+0.1/0.1+0.2/0.2+0.5/0.3+0.8/0.4$$

$$+0.9/0.5+1/0.6+0.6/0.7+0.4/0.8+0.2/0.9$$

$$+0.2/1$$

水道水の腐食性

$$0.4/0+0.4/0.1+0.7/0.2+0.7/0.3+0.7/0.4$$

$$+0.7/0.5+0.7/0.6+0.9/0.7+1/0.8+1/0.9$$

$$+0.9/1$$

### 参 考 文 献

- 1) 久保田鉄工株式会社：ダクタイル管ハンドブック，pp.5～8，昭和61年1月。
- 2) AWWA Research Institute Foundation：Water Main Evaluation for Rehabilitation/Replacement，pp.55～85，40～44，1986。
- 3) 厚生省生活衛生局水道環境部：水道管路更新開発調査報告書，pp.88～107，120～121，昭和61年3月。
- 4) Blockley, D.I.: Predicting the Likelihood of Structural Accidents, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, England, Part 2, Vol. 59, 1975.
- 5) Brown, C.B.: A Fuzzy Safety Measure, Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 105, No. EM5, pp.855～872, Oct. 1979.
- 6) 白石成人・古田 均：信頼性解析法へのファジィ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年9月。
- 7) 朝倉祝治ほか：腐食のメカニズムとその対策（連載第2回），管路情報，No. 4，pp.22～27，1986年1月。
- 8) 電気通信協会：電食防止対策の手引，p.16，昭和59年。
- 9) 大村良樹：ダクタイル鑄鉄管の土中での腐食，文献抄録，水道協会雑誌第515号，pp.126～132，昭和52年8月。
- 10) 遠藤士朗ほか：上水道工学，森北出版，pp.155～157，1988年12月。
- 11) 朝倉祝治ほか：腐食のメカニズムとその対策（連載3，4回），管路情報，No. 5，pp.34～37，1986年4月。
- 12) 中村正一：例解多変量理論解析入門，日刊工業新聞社，昭和54年10月。
- 13) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, pp.338～353, 1965.8.
- 14) Zadeh, L.A.: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process, Trans. Systems, Man and Cybernetics, IEEE, SMC-3, pp.28～44, 1973.
- 15) Shiraiishi, N. and Furuta, H.: Reliability Analysis Based on Fuzzy Probability, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 6, pp.1445～1459, Dec. 1983.
- 16) Tee, A.B., Bowman, M.D. and Sinha, K.G.: A Fuzzy Mathematical Approach for Bridge Condition Evaluation, Civil Engineering Systems, Vol. 5, pp.17～24, Mar. 1988.
- 17) Yao, James T.P. and Furuta, H.: Probabilistic Treatment of Fuzzy Event in Civil Engineering, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 1, No. 1, pp.58～64, 1986.

- 18) Dubois, D. and Prade, H.: Fuzzy Sets and System, Theory and Application, New York, Academic Press, 1980.
- 19) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，昭和 63 年 3 月。
- 20) 寺野寿郎ほか：応用ファジィシステム入門，オーム社，1989 年 4 月。

(1989.9.25・受付)

---