

図 3-9 水撃作用による管の振動速度の位相差分スペクトル 例②

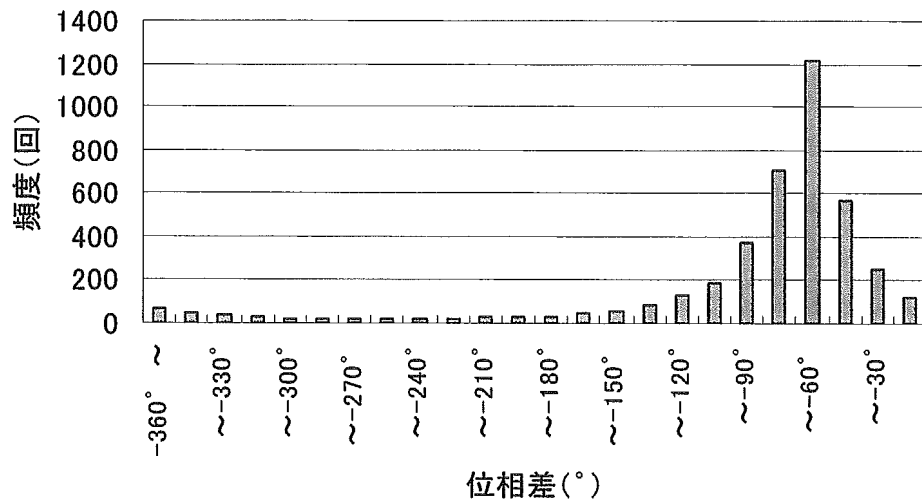


図 3-10 ハンマーによる管の振動速度の位相差分スペクトル 例①

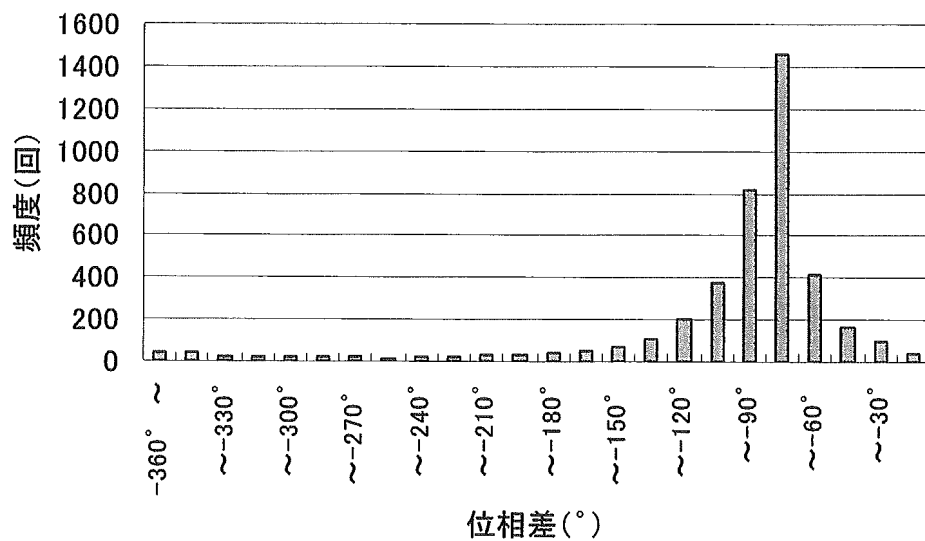


図 3-11 ハンマーによる管の振動速度の位相差分スペクトル 例②

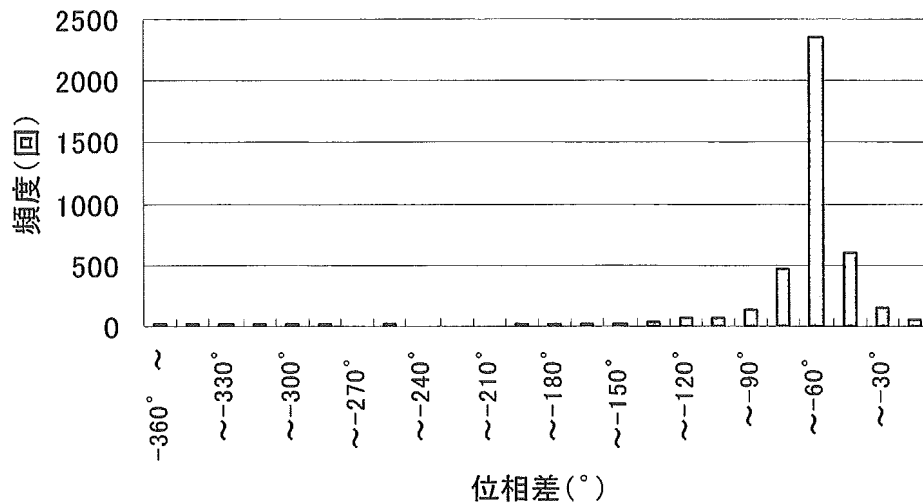


図3-12 ハンマーによる管の振動速度の位相差分スペクトル 例③

### 3. 4 まとめ

4つの評価項目について解析した結果、水撃作用とハンマーによる衝撃との区別がつけられそうなものは、③継続時間と④位相差の割合の2つである。したがって、①卓越振動数と②減衰定数の2つに関しては、判定への影響度はないとしたほうが適当である。また、④位相差の割合では、明瞭に水撃作用とハンマーによる衝撃とで区別がつけられるので判定への影響度を大きくしてファジィ演算に組み込むことにする。

## 4. ファジィ理論に基づく評価モデルの構築とその演算

### 4. 1 評価のパラメータ設定

評価のパラメータとは、後述する評価ルールを構成する要素のことである。すなわち、

- ①最終的に求めようとする評価（総合評価）に影響を与える要因の善し悪し（程度）
- ②個々の要因が総合評価に及ぼす影響度の大きさ
- ③総合評価

以上3つが評価のパラメータと呼ばれるものである。

①に関しては“卓越振動数”など整合性の評価に影響を与えられようと考えられる要因の度合い、②に関しては、各要素が整合性の評価に及ぼす影響の大きさ、例えば「卓越振動数は考慮してもよいが結果にはあまり影響しない」など、③は総合的な判断、例えば「水撃は発生している」等に相当する。以後では、便宜上①、②、③の評価のパラメータを各々G、E、Nと記すことにする。

### 4. 2 評価ルールの策定

ファジィ理論を用いた評価方法の特徴は、評価の非線形性を有しているということである。すなわち、「数多くの要因が存在していても最終的にはその中の1つの要因だけで総合評価する」あるいは、「いろいろな要因を考え合わせるが最終的には1つ、あるいは少数の要因に大きく影響された総合評価になる」ことを前提としている。このことを前述した3個の評価パラメータを用いて記述すると、例えば、「要因Aの“卓越振動数”が水撃作用の伝播速度に対応する振動数に近い値で（g）、かつその要因Aが結果に及ぼす影響が大きければ（e）、その場合の総合評価は“水撃は完全に発生している”（n）ということになる。」というようなルールを導き出すことができる。このようなルールを一般的な推論の形で表現すると、

「 if G=g and E=e then N=n 」

（ただし、g、e、nは各々の評価パラメータG、E、Nの度合いを表示）

となる。すなわち水撃作用が発生しているか否かの評価はGとEの関係によって決められていると考えられる。各パラメータの評価ルールを表4-1に示す。本研究はこのルールに従って水撃作用が発生しているか否かの判定を行う。

表4-1 評価パラメータと基本ルール

評価パラメータE	評価パラメータG	評価パラメータN
大きい	良い ↕ 悪い	しっかりと発生している ↕ 発生していない
比較的大きい	良い ↕ 悪い	ほとんど発生している ↕ かなり発生していない
中ぐらい	良い ↕ 悪い	まあまあ発生している ↕ ある程度発生していない
比較的小さい	良い ↕ 悪い	どちらかというとは発生している ↕ どちらかというとは発生していない
小さい	評価パラメータGの評価がどんな程度でも水撃作用が発生しているか否かの判断にはあまり関係しない	

評価パラメータG：評価項目の善し悪し

評価パラメータE：水撃作用が発生しているか否かの判定に与える影響の大きさ

評価パラメータN：水撃作用発生具合

#### 4. 3 ファジィ理論<sup>2)</sup>

人間は、「かなり大きい」や「まあまあ良い」というような量的に明確につかむことの難しい“あいまいな”表現によりほぼ正しい推論を行い行動している。例えば、「若い人の集合」というものを考えてみる。しかし、若い人の集合といってもどのくらいの年齢より若い人の集合かははっきりしない。「年齢が二十歳以下の人の集合」といえばそれは確定した一般集合であるが、単に「若い人の集合」というのは、どのくらいの年齢より若い人なのかがはっきりしないあいまいな集合である。これから先の分析を進めていく上で、どうしても数学的手法が必要になってくるため、本研究では、“あいまいさ”そのものを扱う理論としてファジィ理論を導入し、その中のファジィ集合の考え方を応用する。

##### (1) ファジィ集合とメンバーシップ関数

ここで、ファジィ集合を定義するためにメンバーシップ関数 (Membership Function) を定める。メンバーシップ関数とは、不明確な表現による集合 (ファジィ集合) の個々の要素がその集合に属する度合いを個々の要素の関数とみなしたものであり、0と1との間の数として数量化することが可能である。

今、対象とするあらゆる要素の集合 (ファジィ集合ではない) を  $U$  とすると、ファジィ集合  $A$  は、 $U$  に属する要素  $x$  に対してメンバーシップ関数  $\mu_A(x)$  を決めることによって定義できる。

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad x \in U$$

すなわち、 $\mu_A(x)$  の値が1に近いほど要素  $x$  が  $A$  に属する度合いは大きく、逆に  $\mu_A(x)$  の値が0に近いほど  $x$  が  $A$  に属する度合いは小さい。特に、すべての要素についてメンバーシップ関数の値が0か1しかとれないときは、一般集合になる。これは一般集合の特性関数と呼ばれている。一例として「若い人の集合」をメンバーシップ関数によって表すと、図4-1のようになる。同様に、一般集合「年齢が二十歳以下の人の集合」も図のように表せる。これらのメンバーシップ関数の値は主観的に決められるものであり、人の主観的な評価値を表している。

##### (2) ファジィ集合の基本的演算

一般集合に関する基本的演算としては和集合 (結び)、積集合 (交わり)、補集合などがあるが、ファジィ集合についてもこれらの演算を定義することができる。ここで、その和集合と積集合について説明する。

###### a) 和集合

2つのファジィ集合  $A$ ,  $B$  を考え「 $A$  または  $B$ 」という集合を考えると、ある要素が両方の集合に属する度合いのうち大きい方の値をとれば良いことになる。これを、ファジィ集合の和集合という。一般的に表すと次のようになる。2つのファジィ集合  $A$  と  $B$  の和集合は

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

で定義される。

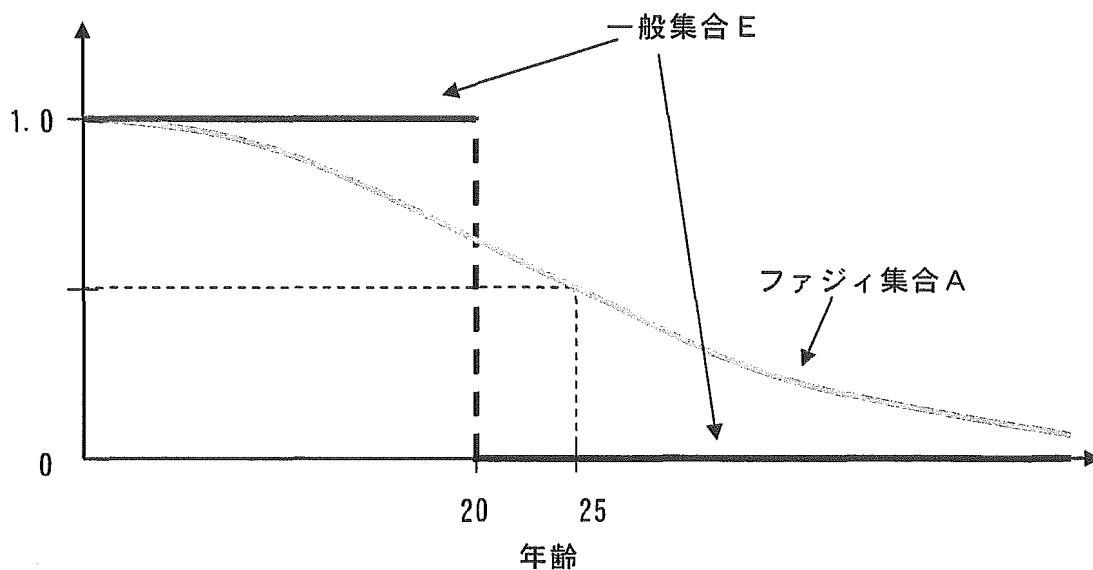
### b) 積集合

和集合と同様に「AかつB」という集合を考える。これは、ある要素  $x$  が両方の集合に属する度合いのうち小さい方を取ればよいことになる。これをファジィ集合の積集合という。2つのファジィ集合AとBの積集合は、一般的に

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

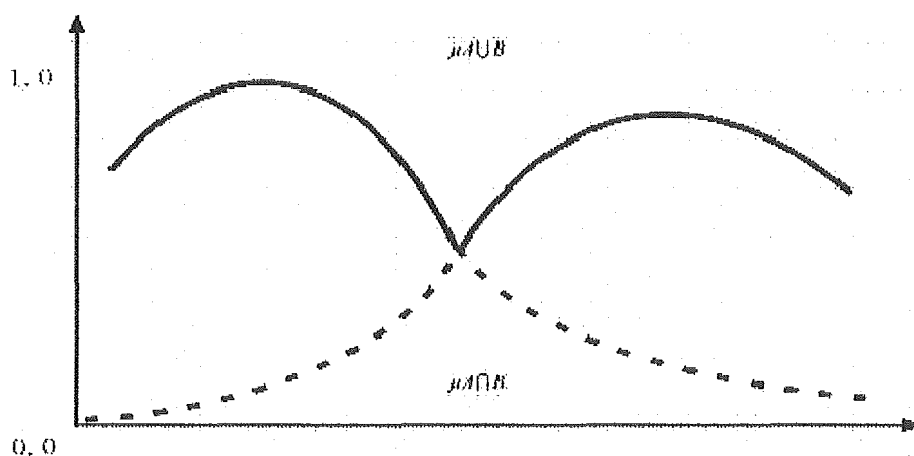
で定義される。

以上のことを図で表すと図4-2のようになる。



ファジィ集合A：「若い人の集合」 一般集合E：「年齢が二十歳以下の人の集合」

図4-1 ファジィ集合と一般集合



和集合(実線)：両方の集合に属する度合いのうち大きい方の値  
積集合(点線)：両方の集合に属する度合いのうち小さい方の値

図4-2 ファジィ集合の基本的演算

#### 4. 4 評価ルールのファジィ的表現

ファジィ集合の考え方を応用して、先に策定した評価ルールをファジィ集合によって表現することを考える。すなわち、「大きい」「良い」といったあいまいな表現をファジィ集合とすることにより、人間の言葉のあいまいさをそのまま分析に利用していくことを考える。

そこで、まずファジィ集合G上で「良い」「標準的」「悪い」というあいまいな表現をメンバーシップ関数を用いて表すと、図4-3のように表すことができる。

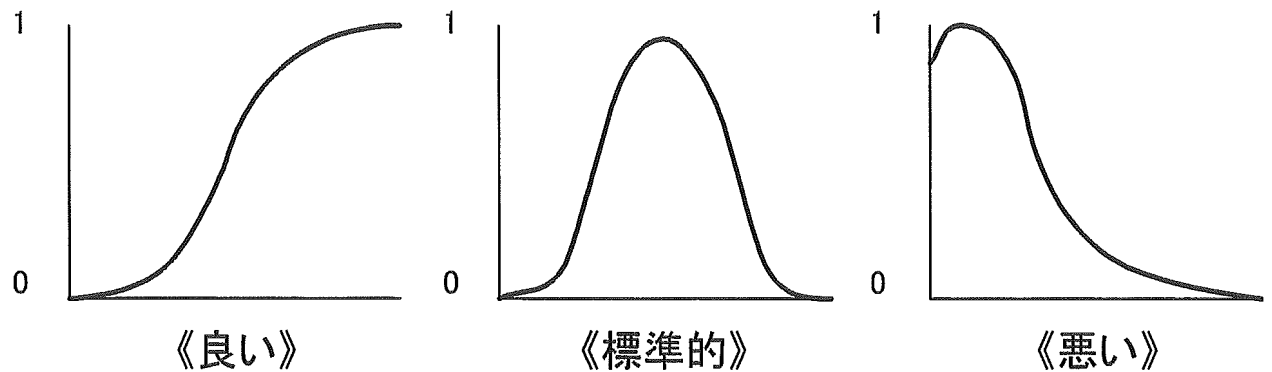


図4-3 パラメータGのファジィ的表現によるメンバーシップ関数

同様に、「大きい」「中くらい」「小さい」などをそれぞれファジィ集合E, N上でメンバーシップ関数を与え表現すると図4-4のようになる。なお、図4-4は個々の要素に対するメンバーシップ関数の値を曲線的に結んだものを示している。これらのメンバーシップ関数は主観的に決定したものであるが、誰が決定してもその形状が大幅に変わってしまうものではなく不合理ではないものといえよう。本研究で用いたメンバーシップ関数は後に記載する。

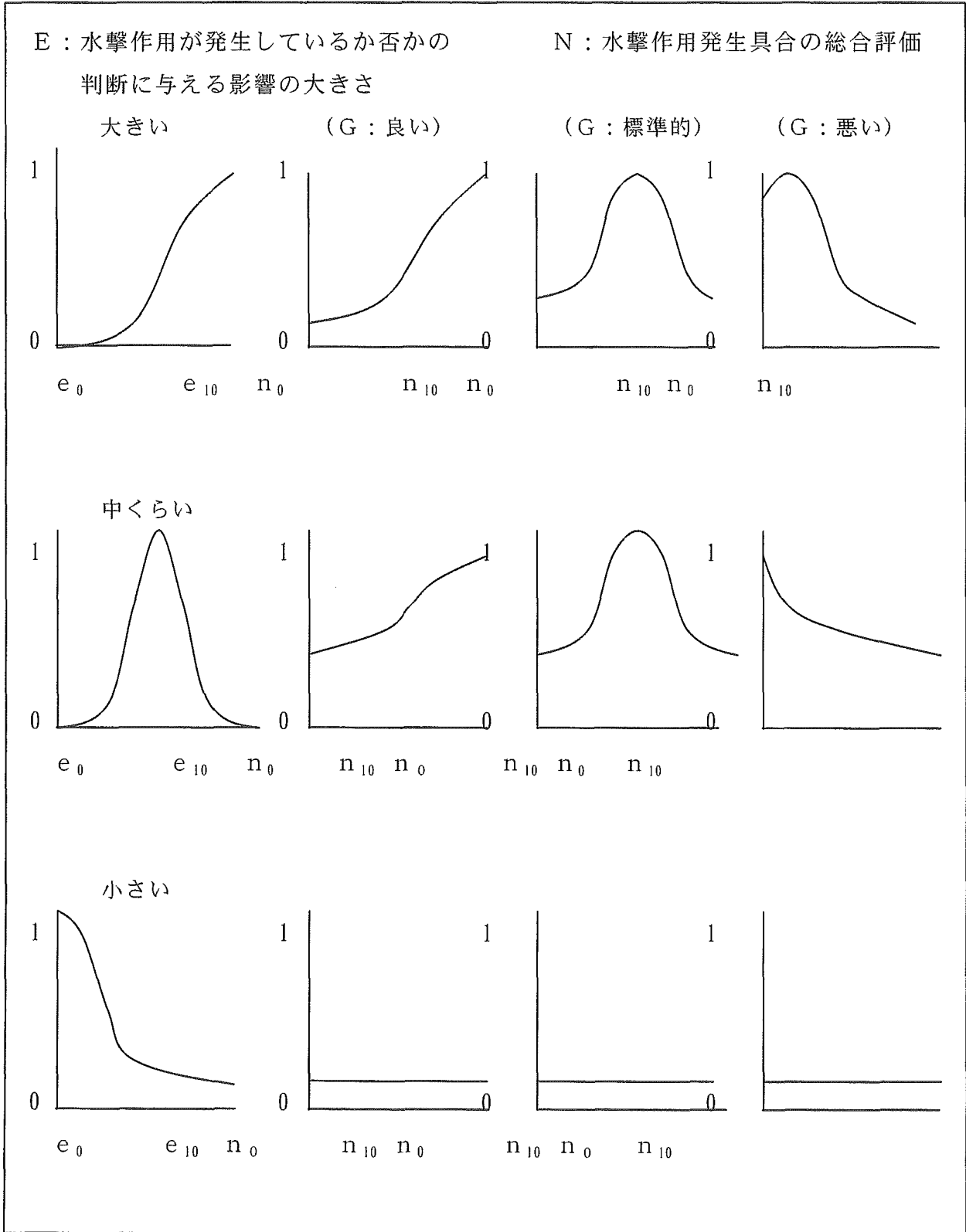


図4-4 パラメータE、Nのファジィ的表現によるメンバーシップ関数

## 4. 5 評価モデルの構築とその演算

### (1) 演算方法

メンバーシップ関数によって表示された3個の評価パラメータG, E, Nを評価ルールに基づいて関係づける演算方法は以下のようにする。

#### 『ステップ1』

各評価項目(要因)ごとに評価ルールを(G, E)行列、(E, N)行列に分けて表す。ある評価項目Aに関して、評価のパラメータG, Eがそれぞれ「良い」、「大きい」と推定されたとき、評価ルールによれば、パラメータNは「しっかりと発生している」となる。このときのGとEの関係は「Gは良くて、かつEが大きい」という積集合の関係になっている。従って(G, E)行列は、G, Eの各成分のうち小さい方の値を成分とした行列になる。また、EとNの関係も「Eが大きいときはNの表現も確定的になる」ことを考えると積集合と見なす方が妥当であるので、両者の関係は積集合の関係にあるとする。従って、(G, E)行列と同様に(E, N)行列を求めることができる。なお、(G, E)行列とは、Gに属する個々の要素 $g_i$  ( $i=0\sim m-1$ ,  $m$ は要素数)のグレードを示す値を「行」成分として、またEに属する個々の要素 $e_j$  ( $j=0\sim m-1$ ,  $m$ は要素数)のグレードを示す値を「列」成分としてファジィ演算を行って得られる行列を表している。

#### 『ステップ2』

要因ごとに求められた(G, E)行列及び(E, N)行列をそれぞれ1つに合成する。ここでは個々の要因ごとに得られている(G, E)行列の和集合を求める。すなわち、合成された(G, E)行列の第(i, j)成分を $a_{ij}$ とすると、

$$a_{ij} = \max \{ a_{ij}^k \mid k=1, 2, \dots, m \} \quad \text{for all } i, j$$

となるような行列を求めることになる。同様のことを(E, N)行列についても行う。

#### 『ステップ3』

(G, E) × (E, N)により(G, N)行列を求める。ステップ2で求めた(G, E)行列と(E, N)行列の積をとることにより、(G, N)行列を求める。一般の行列の積は対応する成分の積の総和をその成分とするが、ファジィ演算では対応する成分の最小値(小さい方の値)を順次とっていき、その中の最大値を求めてその成分とする。例えば求める行列の第(1, 1)成分 $b_{11}$ は

$$b_{11} = \max \{ \min \{ c_{1i}, d_{i1} \} \mid i=1, 2, \dots, m \}$$

となる。ただし $c_{1i}$ ,  $d_{i1}$ は、それぞれ(G, E)行列の第(1, i)成分、(E, N)行列の第(i, 1)成分である。

#### 『ステップ4』

(G, N)行列のうち、各列の中で最大値をとる。各列の最大値を取ることで非線形性を表すことができる。すなわち、パラメータNの各要素、例えば $n_0$ (水撃作用が発生しているか否かの総合評価)の度合いがどの程度かを求める場合、列の最大値によって決ま





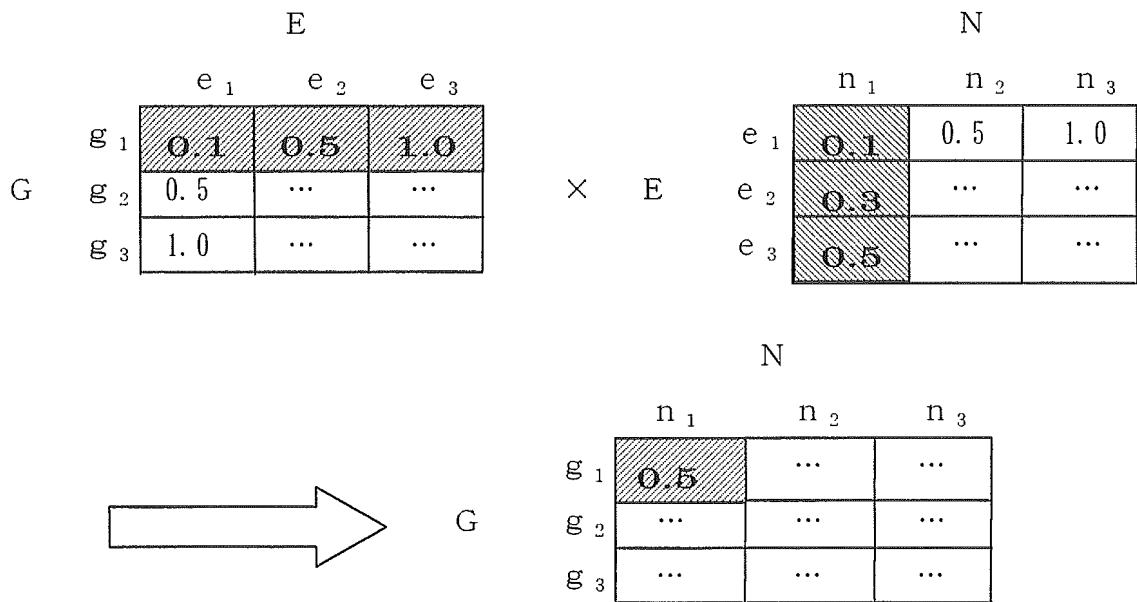


図4-6 ファジィ積分モデル

(2) 評価基準

「卓越振動数」「継続時間」「減衰定数」「位相差の割合」の4つの項目に、その善し悪し(パラメータG)、水撃が発生しているか否かの判断に与える影響度の大きさ(パラメータE)、水撃作用発生具合の総合評価(パラメータN)の3つのパラメータに関して、メンバーシップ関数を決めていくことにする。最初に、各評価項目の善し悪しを「良い」「まあまあ良い」「どちらとも(良いとも悪いとも言えない)」「まあまあ悪い」「悪い」の5つの基準に分ける。決定された評価基準を表4-1に示す。この評価基準は、演算の実行にあたり微調整を繰り返し、最適と思われるものを決定とした。また、「卓越振動数」「減衰定数」の2つの項目は水撃が発生しているか否かの判断への影響度をゼロとしたので表4-1では、「継続時間」「位相差の割合」の2つの評価基準だけを示した。この評価基準により、実験で得たシステム構築用124のデータは表4-2のように分類される

表4-1 評価基準

継続時間 (sec)		位相差の割合	
1.690 以上	評価⑤	0.937~1.000	評価⑤
1.380~1.689	評価④	0.849~0.936	評価④
1.000~1.379	評価③	0.806~0.848	評価③
0.580~0.999	評価②	0.700~0.805	評価②
0.579 以下	評価①	0.699 以下	評価①

表 4 - 2 評価基準によるデータ分類

水撃作用			ハンマー		
位相差の割合	継続時間	データ数	位相差の割合	継続時間	データ数
⑤	⑤	1	④	⑤	1
⑤	④	4	③	⑤	1
⑤	②	2	③	②	1
④	⑤	13	③	①	1
④	④	9	②	⑤	1
④	③	7	②	③	1
④	②	18	②	②	1
③	④	2	②	①	11
③	③	2	①	⑤	7
③	②	1	①	④	2
			①	③	4
			①	②	14
			①	①	20
データ合計		59	データ合計		65

### (3) メンバースhip関数の作成とファジィ判定図

システム構築用 124 のデータを用いて「位相差の割合」に重みをおいたメンバースhip関数を決定した。決定したメンバースhip関数を図 4 - 7 ~ 図 4 - 10 に示す。また、「位相差の割合」に重みをおいたメンバースhip関数を用いてファジィ演算を実行した。全 25 パターンのファジィ判定結果を図 4 - 11、図 4 - 12、図 4 - 13 に示す。

### (4) 演算結果の考察

システム構築用 124 のデータを用いてメンバースhip関数を作成しファジィ演算を実行した。水撃作用発生データ 59 個中 54 個はファジィ判定図のピーク値が評価 4 か評価 5 となっている。つまり、「水撃作用が発生している」との判定が得られた。また、ハンマーで与えた衝撃データ 65 個中 61 個はファジィ判定図のピーク値が評価 1 か評価 2 となっている。すなわち、「水撃は発生していない」との判定が得られた。これらより、今回決定した評価基準とメンバースhip関数はかなり精度よく水撃が発生しているか否かの判定ができるものといえる。しかし、継続時間の評価⑤に関しては、位相差の割合の評価①と②でファジィ判定図の形状がピーク値は評価 1 にあるが、中央で折り曲げたようになっている。これを修正するために、メンバースhip関数の形状に関し微調整を繰り返したが、判定の精度が定価してしまい、精度の向上には至らなかった。

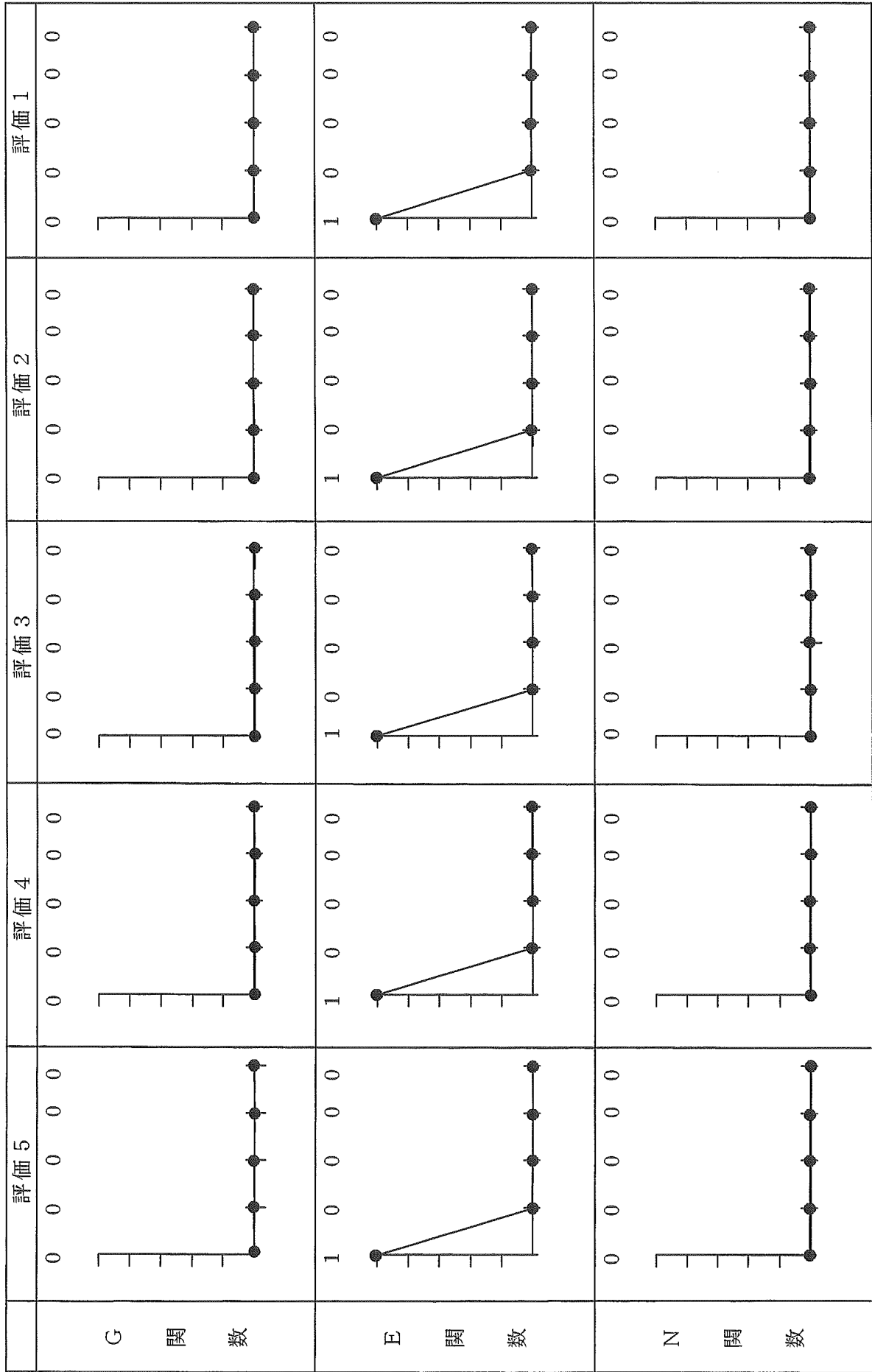


図 4-7 卓越振動数のメンバーシップ関数

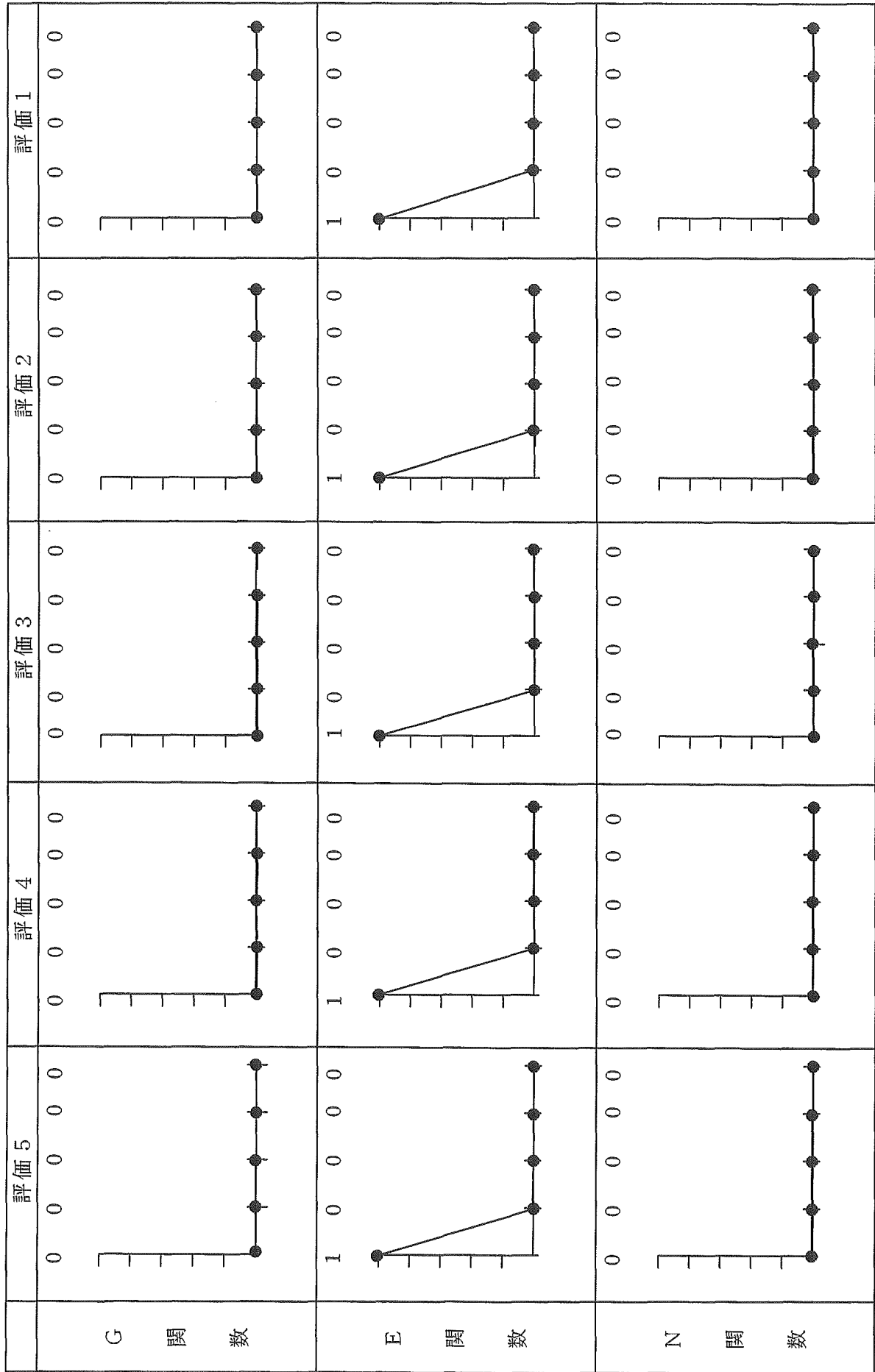


図 4-8 減衰定数のメンバーシップ関数

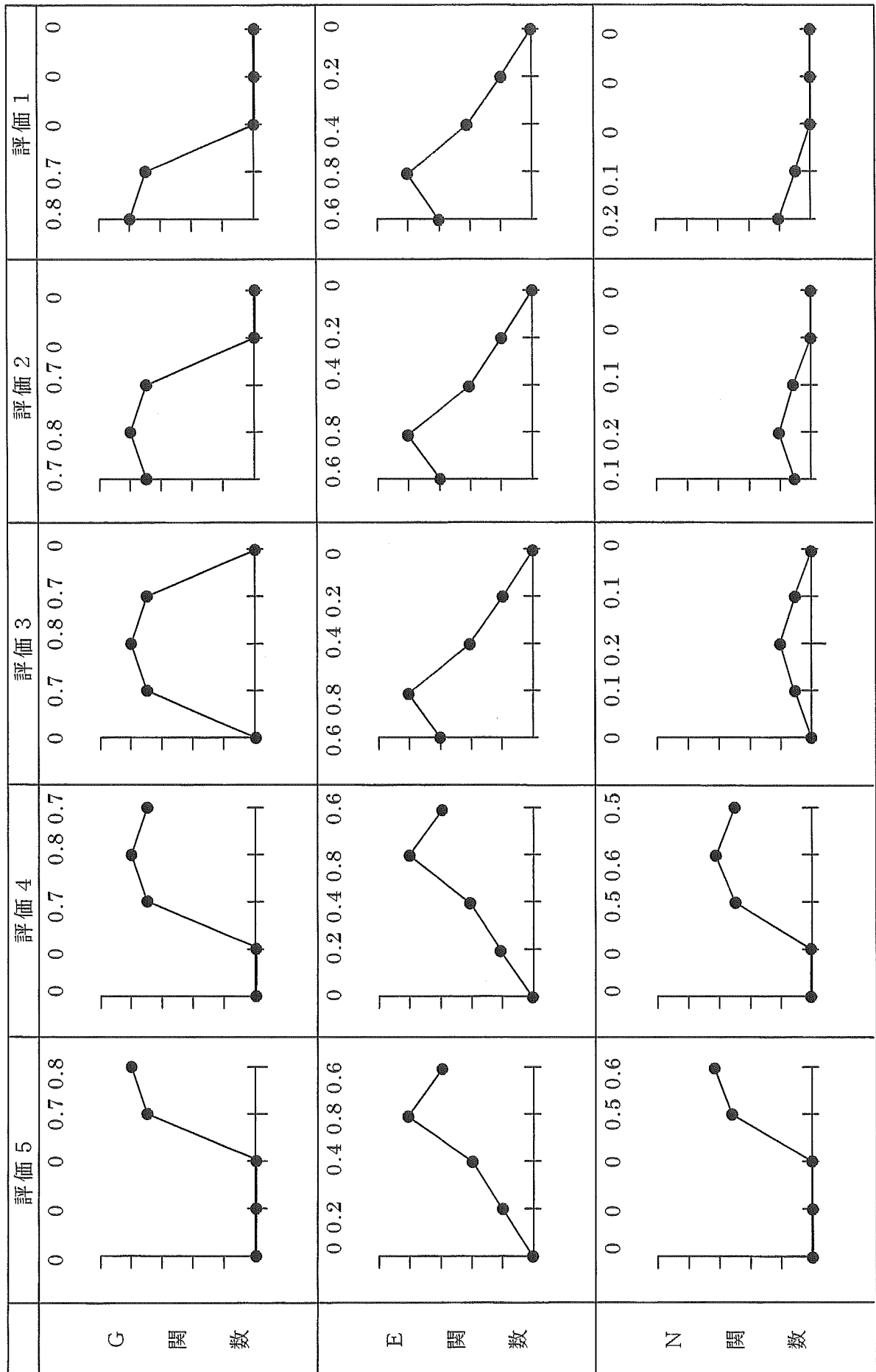


図4-9 継続時間のメンバーシップ関数

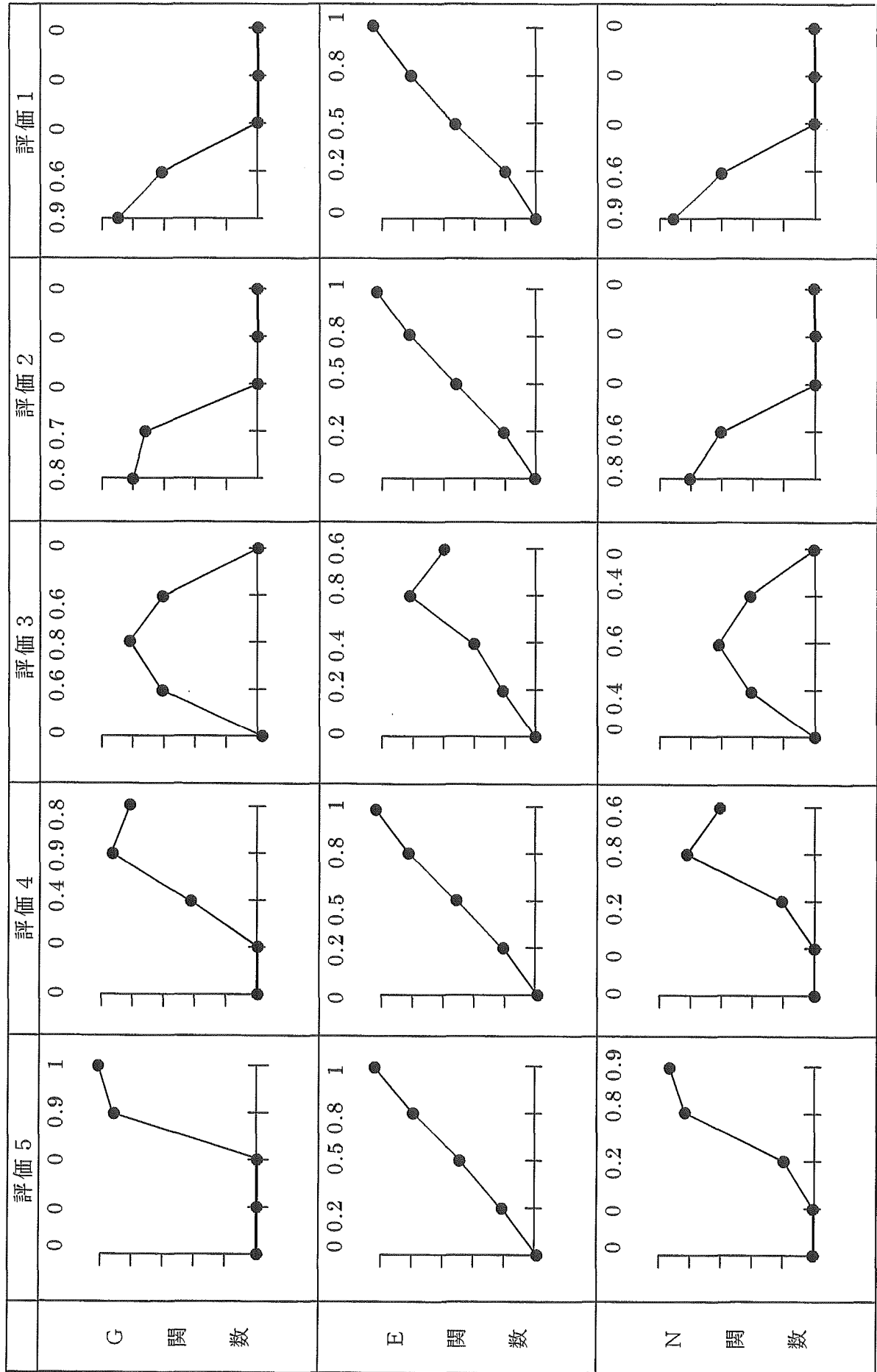
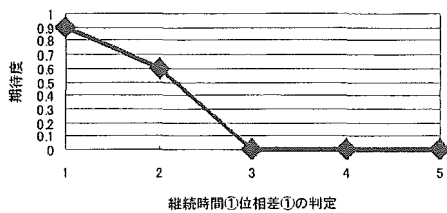
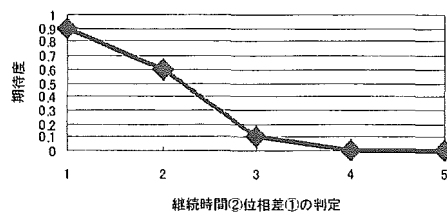


図 4-10 位相差割合のメンバーシップ関数

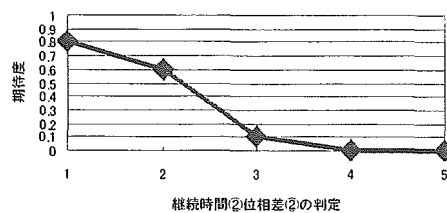
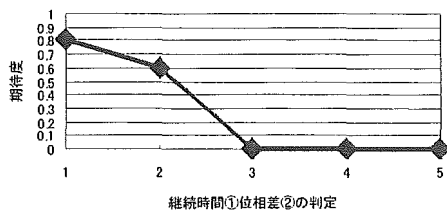
継続時間 評価①



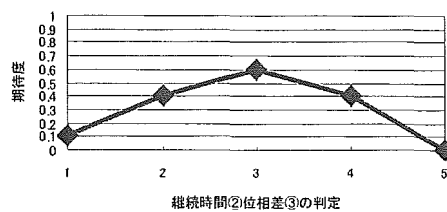
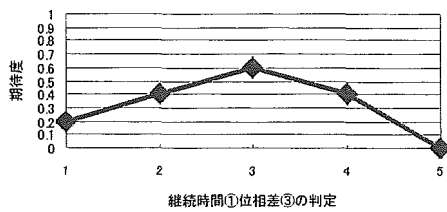
継続時間 評価②



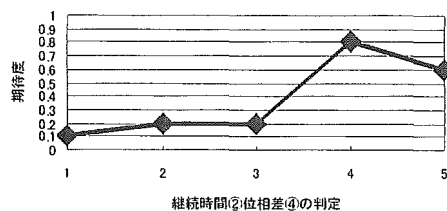
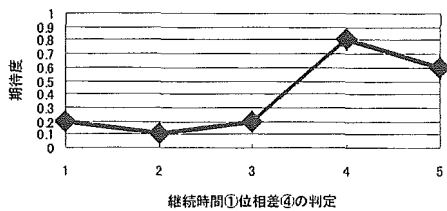
位相差 ①



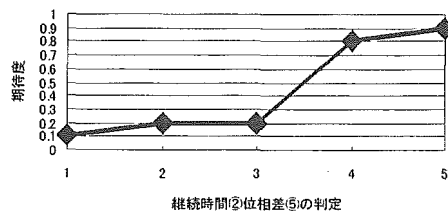
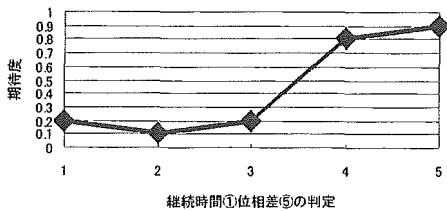
位相差 ②



位相差 ③



位相差 ④



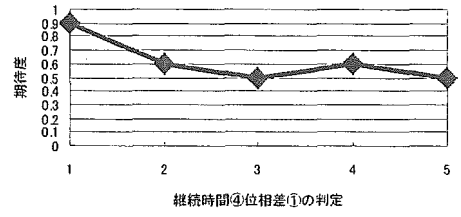
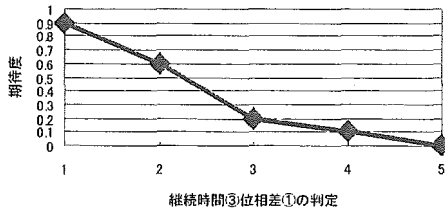
位相差 ⑤

図 4-1-1 ファジィ判定結果図（継続時間の評価が①と②の場合）

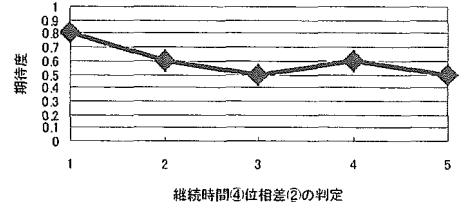
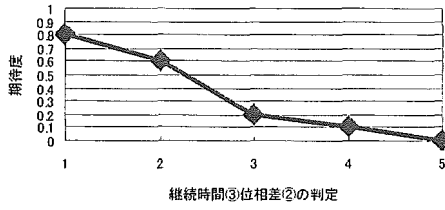


継続時間 評価③

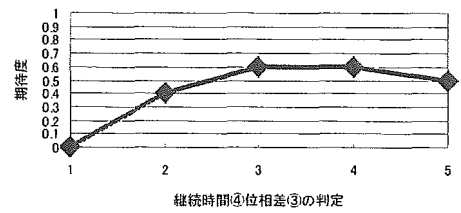
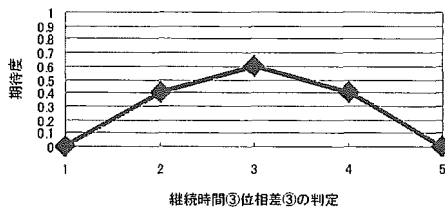
継続時間 評価④



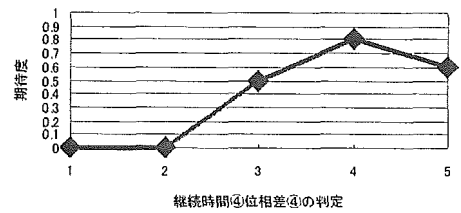
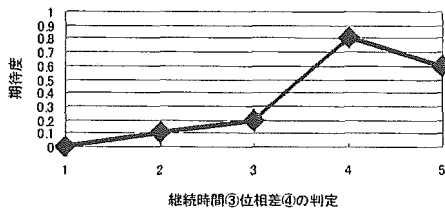
位相差 ①



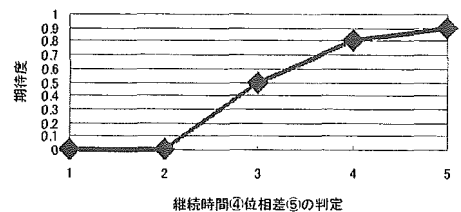
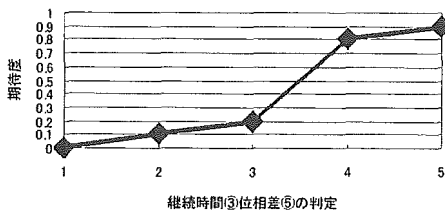
位相差 ②



位相差 ③



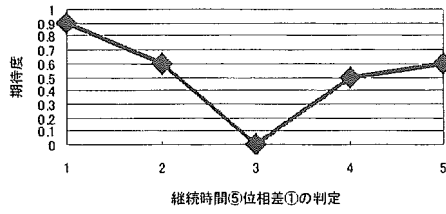
位相差 ④



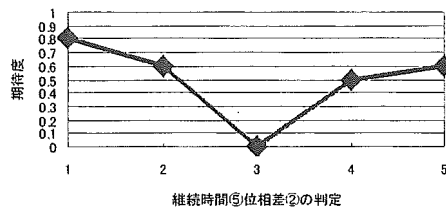
位相差 ⑤

図 4-12 ファジィ判定結果図（継続時間の評価が③と④の場合）

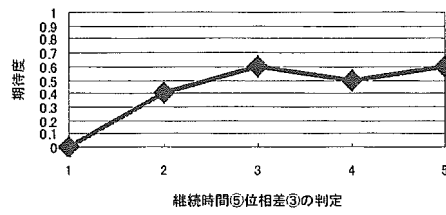
### 継続時間 評価⑤



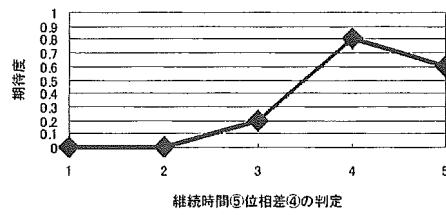
位相差 ①



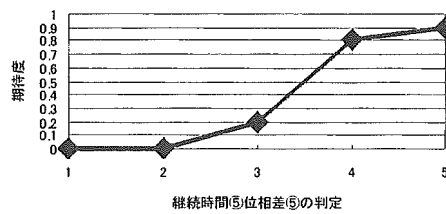
位相差 ②



位相差 ③



位相差 ④



位相差 ⑤

図 4-13 ファジィ判定結果図  
(継続時間の評価が⑤の場合)

## (5) ファジィ判定図の判定基準

### a) 判定項目の抽出

ファジィ判定のプログラムを実行して得られた結果の図から水撃作用が発生しているか否かを判断するためには、その判定結果図として得られるメンバーシップ関数の形状の評価のしかたに関して検討を加える必要がある。そこで、昨年までに高力ボルト緩みチェックシステム用に構築した判定基準を水撃作用発生の有無の判定用に改良を加えた。具体的には、ファジィ判定結果の図より、①ピーク値 ②ある点以上の面積の全体に占める割合を判定項目とし、システム構築用 124 のデータを、高い精度で判断できると思われるものを用いて決定した。以下に、その詳細を記す。

### b) ファジィ演算結果に対する判定基準

①ピーク値 ②ある点以上の面積の全体に占める割合に着目し「水撃作用が発生している」「水撃作用発生の可能性がある」「水撃作用は発生していない」の判断基準を以下のように決定した。

「水撃作用が発生している」

ピーク値が 4 点以上 and 3 点以上の面積の全体に占める割合が 60% 以上  
(ただし、ピーク値が 2 箇所以上ある場合は、高い評価の方を選ぶ)

「水撃作用発生の可能性がある」

ピーク値が 3 点 and 3 点以上の面積の全体に占める割合が 60% 未満  
(ただし、ピーク値が 2 箇所以上ある場合は、高い評価の方を選ぶ)

「水撃作用は発生していない」

上記二つの条件をいずれも満たさない

これらの基準を図で表すと、図 4-14 のようになる。

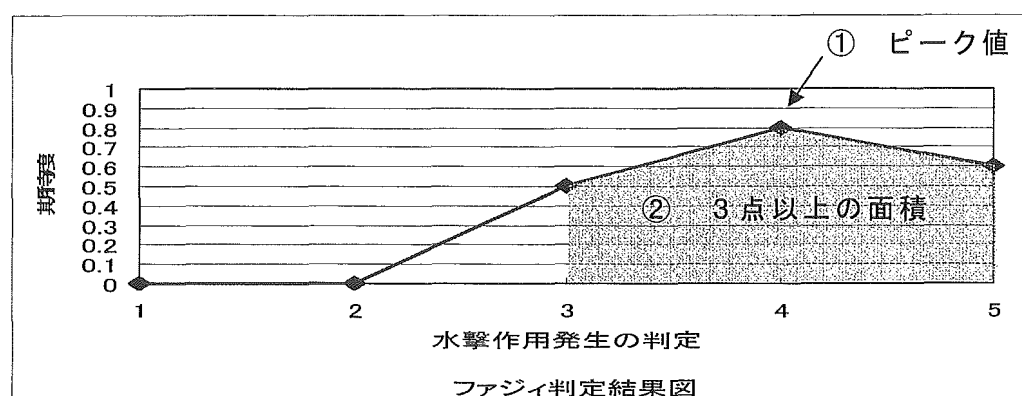


図 4-14 評価基準の例

### c) 判定結果

このファジィ判定図の判定基準をもとにシステム構築用 124 のデータを判定すると表 4-3 のようになる。表 4-3 では、「水撃作用が発生している」を◎、「水撃作用発生の

可能性がある」を△、「水撃作用は発生していない」を×で表している。表4-3より、実際に水撃作用が発生している場合のデータに対しては、59データ中56データで「水撃が発生している」と判定しており、ハンマー衝撃のデータに対しては、65データ中61データで「水撃は発生していない」と判定していることがわかる。これより、水撃作用が発生しているか否かの判定システムを  $117/124 \approx 94\%$  の精度で構築できたことになる。

表4-3 判定基準によるデータ分類

水撃作用				ハンマー衝撃			
位相差の割合	継続時間	データ数	判定	位相差の割合	継続時間	データ数	判定
⑤	⑤	1	◎	④	⑤	1	◎
⑤	④	4	◎	③	⑤	1	◎
⑤	②	2	◎	③	②	1	△
④	⑤	13	◎	③	①	1	△
④	④	9	◎	②	⑤	1	×
④	③	7	◎	②	③	1	×
④	②	18	◎	②	②	1	×
③	④	2	◎	②	①	11	×
③	③	2	△	①	⑤	7	×
③	②	1	△	①	④	2	×
				①	③	4	×
				①	②	14	×
				①	①	20	×
データ合計		59		データ合計		65	

## 5. 本研究で構築したシステムの有効性のチェック

### 5.1 チェック用データの収録と解析

本章では、これまでに構築した「水撃作用が発生しているか否かのファジィ判定システム」の有効性のチェックを行うため、新たに48のデータを収録してファジィ判定を試みた。表5-1、表5-2は収録したデータ波形を解析し、継続時間と位相差の割合の評価基準を照らし合わせたものである。