

# ファジイ測度とファジイ積分を用いた回転機器の故障診断

角山 正博\*, 堀 隼人\*\*, 神野 洋一\*\*,  
小川 昌幸\*\*, 佐藤 達雄\*\*

(平成 27 年 10 月 30 日受理)

## Applying Fuzzy Measure and Integral to Diagnose Faults in Rotating Machinery

Masahiro TSUNOYAMA\*, Hayato HORI\*\*, Hirokazu JINNO\*\*,  
Masayuki OGAWA\*\* and Tatsuo SATO\*\*

This paper proposes a system for diagnosing faults in rotating machinery utilizing fuzzy measure and integral. The membership functions and fuzzy measure are composed based on the syndrome matrix made by skilled engineers. The possibility of faults are determined by the fuzzy integral using the membership degree and fuzzy measure for spectra. The paper also evaluates the method using an example of fault diagnosis of backlash fault.

Key words: Fault diagnose, Rotating machinery, Fuzzy measure, Fuzzy integral

### 1. はじめに

回転機器の保守管理が故障発生後に修理を行う事後保全から、故障の兆候を検知して事前に適切な保守を行う状態監視保全に移行している<sup>[1]</sup>。状態監視保全では定期的に機器の状態を監視して保全計画を作成するため、事後保全に較べて診断の機会が増加し、多くの診断技術者が必要になる。この要求に応えるために、診断技術者を支援する幾つかの自動故障診断システムが提案されている<sup>[2][3]</sup>。しかしこれらのシステムには、扱える故障原因の数が少ないことや同定精度が十分でないこと等の問題がある。

著者らはいままで診断技術者を支援するための故障診断システムの研究を進めてきた。このシステムは診断対象である機器の構造等に基づく確定的な判断をクリस्प診断で行い、診断技術者の経験等に基づく曖昧さを含む判断をファジイ測度とファジイ積分を用いて実現している。本稿では著者らが進めてきた研究を紹介すると共に、試作したシステムを用いた故障診断の結果について報告する。

### 2. 振動法に基づく故障診断

---

\* 情報電子工学科教授 Department of Information and Electronics Engineering, Professor

\*\* 日本フローサーブ株式会社 Flowserve Japan Co., Ltd.

## 2.1 回転機器と振動の測定箇所

回転機器の故障診断には、振動法や潤滑油分析法、熱画像解析法等の種々の方法が用いられている。これらの中で、扱える故障原因に対し診断データの採取が容易で実績が多い事から振動法が広く用いられている<sup>[4]</sup>。振動法では、診断対象機器の定められた位置に設置したセンサーから得られる振動データをもとに、故障の有無やその原因を診断する。

図1に横型単段オーバーハング機器（片持ちポンプ）の構造と振動測定箇所を示す。振動測定は図に示すように、回転機器の評価基準である国際規格等に基づいて、ベアリングハウジングのカップリング側の3か所（垂直（CV）、水平（CH）、軸（CA））と、同じく反カップリング側の3か所（垂直（RCV）、水平（RCH）、軸（RCA））の計6箇所で行われる事が多い。この6か所を振動の測定方向と呼ぶ。

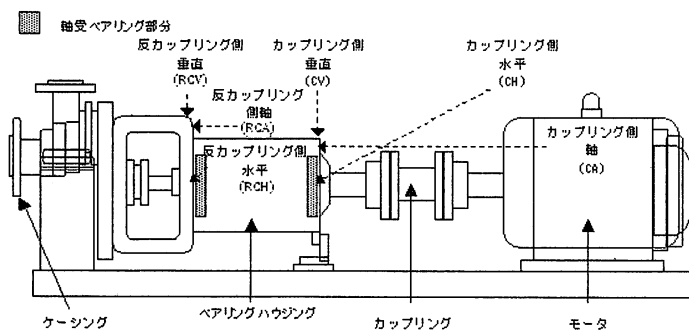


図1 横型単段オーバーハング機器（片持ちポンプ）

## 2.2 振動の周波数成分

回転機器に故障が発生すると、6か所で測定した振動の振幅や周波数成分が変化する。振動法ではその特徴に基づいて故障原因を同定する。故障が発生した機器で測定した振動を周波数分析した例を図2に示す。ここでは振動の周波数成分を振動スペクトル(以下スペクトルと呼ぶ)という。この例では60Hzのスペクトル（回転周波数成分1N）が120Hzのスペクトル（2倍高調波成分2N）よりも大きくなっているため、振動法ではこの特徴に基づいて発生している故障はアンバランスの疑いがあると診断する。

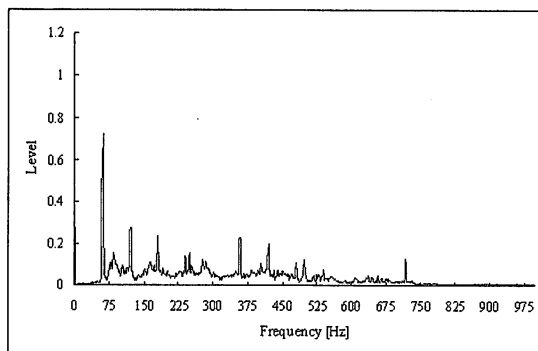


図2 振動スペクトル

振動法では測定した振動データを、「速度域」「エンベロープ」及び「加速度域」の3つの領域に分ける。各領域の用途を次に示す。なおエンベロープとは、高調波加速度波形に包絡線処理を施し周波数分析したものをいう。

表1 振動データの領域

速度域	1~1000[Hz]
	構造的な異常による振動や自励振動などを発生させる故障原因の診断において、その大きさとスペクトルを調べるために用いる。
加速度域	1000~20000[Hz]
	衝撃振動を発生させる故障原因の診断において、振動の大きさを調べるために用いる。
エンベロープ	1~1000[Hz]
	衝撃振動を発生させる故障原因の診断において、発生した高調波加速度波形の周期性を調べるために用いる。

### 2.3 故障診断の概要

故障診断は確定的な判断に基づくクリスピー診断と、診断技術者の経験等に基づく曖昧さを含むファジイ診断の二段階で行われる。前者のクリスピー診断では、関連する規格に基づいて、振動の大きさから故障の有無を決定することや、診断対象である機器の構造上発生し得ない故障原因を除外すること等が含まれる。本稿では後者のファジイ診断を中心に説明する。

### 2.4 正規化

診断では各スペクトルの値そのものではなく、先に示した各測定方向における3つの領域のスペクトルの相対的な値、すなわち全てのスペクトルまたは指定したスペクトルの集合に占める各スペクトルのパワーの比率を用いる。この比率を求めることを正規化と呼び、方向  $d (\in \{CV, CH, CA, RCV, RCH, RCA\})$  における比率は次式で与えられる。

$$p_{d,i} = s_{d,i}^2 / OA_d^2 \quad (2.1)$$

式中の  $s_{d,i}$  は方向  $d$  におけるスペクトル  $i (\in \{1n, 2N, \dots\})$  の振幅（実効値）を表し、 $OA_d$  は方向  $d$  における全てのスペクトルまたは指定したスペクトルの集合の実効値を表す。これを  $OA$  値と呼んでいる。また  $n$  は集合に含まれるスペクトルの数である。この他に診断では異なる測定方向の  $OA$  値の比を用いる。

### 2.5 振動兆候マトリクス

ファジイ診断ではスペクトルの比率とメンバーシップ関数を用いて適合度を求めた後、

ファジイ測度を用いてファジイ積分を行い故障原因の可能性を決定する。この時用いるメンバーシップ関数及びファジイ測度は、振動兆候マトリクス(以下兆候マトリクスと呼ぶ)に示された値を用いて決められる。兆候マトリクスの値は基本的に診断技術者の知見に基づいて決められるが、一部の値は測定したデータの統計的な性質に基づいて決めている<sup>[5]</sup>。兆候マトリクスの例を表2に示す。表中の(i)は診断に用いるスペクトルの名称、(ii)は左からメンバーシップ関数の最小値、中間値及び最大値、また(iii)は正規化がすべてのスペクトルに対して行われる場合を全体、指定したスペクトルの集合に対して行なわれる場合を部分としている。なお(ii)における”-“は、最小値0または最大値1を表す。(iv)は領域におけるスペクトルの重視度、(v)は全体に対する領域の重視度、また(vi)は比較を行う測定方向のOA値の比である。なお重視度は、診断の際に診断技術者が重視する度合いであり、後で述べるファジイ測度を求める際に用いる。

表2 振動兆候マトリクス

故障原因名	速度域			加速度域			エンベロープ			振動の方向性		
	1N	...	速度域の重視度	1N	...	加速度域の重視度	1N	...	エンベロープの重視度	RcV>Cv	...	振動の方向性の重視度
シール部の接触												
アンバランス												
...												

速度域					
(i)	FN	1N	2N	...	速度域の重視度
(ii)	-/0.3/0.48	0.30/0.62/0.81	0.61/0.73/-	-	0.7 ← (v)
(iii)	全体	部分	部分	-	
(iv)	0.1	0.7	0.2	-	

振動の方向性				
(vi)	OA <sub>RcV</sub> , OA <sub>Cv</sub>	OA <sub>RcH</sub> , OA <sub>CH</sub>	...	振動の方向性の重視度
	-/0.3/0.48	0.30/0.62/0.81	-	0.2
	部分	部分	-	
	0.2	0.8	-	

### 3. ファジイ測度とファジイ積分

#### 3.1 ファジイ集合とメンバーシップ関数

故障診断で用いるファジイ集合は離散ファジイ集合である。ファジイ集合  $\tilde{A}$  は次式で定義される。

$$\tilde{A} = \sum_{x_k \in A} h(x_k) / x_k \quad (3.1)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad A \subset X$$

ここで  $X$  を台集合、 $h(x)$  を要素  $x_i$  の適合度と呼び  $x_i$  が集合  $A$  に属する度合いを表す。関数  $h$  は式(3.2)で表され、ファジイ集合  $\tilde{A}$  のメンバーシップ関数と呼ばれる。故障診断に用いるメンバーシップ関数には図3に示す3種類があり、兆候マトリクスに示されている最小値、中間値、及び最大値を用いて決められる。

$$h: X \rightarrow [0,1] \quad (3.2)$$

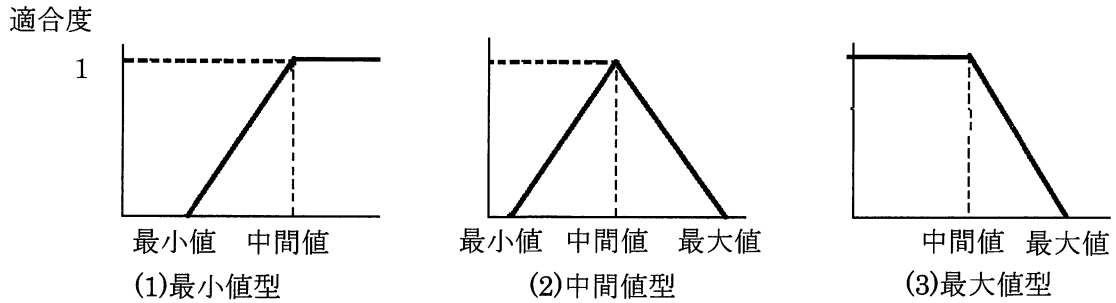


図3 メンバシップ関数の型

### 3.2 ファジイ測度

ファジイ測度は台集合の巾集合に実数値を対応させる，(C1)から(C3)の3条件を満たす集合関数である<sup>[6]</sup>．ここで  $A, B$  は  $X$  の部分集合であり  $g$  は集合関数である．

$$g: 2^X \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

$$(C1) \quad g(\phi) = 0, \quad g(X) = 1 \quad (3.4)$$

$$(C2) \quad A \subset B \Rightarrow g(A) \leq g(B) \quad (3.5)$$

$$(C3) \quad \lim_{i \rightarrow \infty} g(A_i) = g(\lim_{i \rightarrow \infty} A_i) \quad (3.6)$$

条件(C1)はファジイ測度の正規性，(C2)は単調性，(C3)は連続性と呼ばれる．本稿では次式で定義されるファジイ測度を用い，これを相互作用係数に基づくファジイ測度と呼ぶ<sup>[7],[8]</sup>．

$$g(A_i) = \omega_0 \cdot (\alpha_{A_i} + \beta_{A_i}), \quad A_i \subset X \quad (3.7)$$

$\alpha_{A_i}$  は集合  $A_i$  に属する要素の重視度の和であり， $\beta_{A_i}$  は式(3.10)に示す  $K_{r,s}$  と重視度を用いて

式(3.9)で与えられる．ここで  $W$  は兆候マトリクスで示される重視度の集合であり，

$\sum_{i=1}^n w_i = 1$  である．

$$\alpha_{A_i} = \sum_{t=1}^n w_t, \quad w_t \in W \quad (3.8)$$

$$\beta_{A_i} = \sum_{r=i}^n \sum_{s=r+1}^n K_{r,s} (w_r + w_s) \quad (3.9)$$

$$K_{r,s} = |k_{r,s}| / (1 - |k_{r,s}|) \quad (3.10)$$

ここで  $A_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$  であり， $K_{r,s}$  を要素  $x_r$  と  $x_s$  の相互作用係数と呼ぶ．

なお本稿では  $k_{r,s}$  として要素  $x_r$  と  $x_s$  の偏相関係数を用いている<sup>[8]</sup>．

$\omega_0$  はファジィ測度の正規性を満たすための定数であり，次式で与えられる．

$$\omega_0 = 1 / \left( 1 + \sum_{r=1}^{n-1} \sum_{s=r+1}^n K_{r,s} (w_r + w_s) \right) \quad (3.11)$$

ファジィ測度は相互作用係数の値によって，集合 A と B の間の次の 3 通りの相互作用を表すことが出来る．

$$(I1) \quad g(A \cup B) = g(A) + g(B)$$

$$(I2) \quad g(A \cup B) > g(A) + g(B)$$

$$(I3) \quad g(A \cup B) < g(A) + g(B)$$

(I1)は加法性と呼ばれ A と B が互いに独立である場合に，また(I2)は優加法性と呼ばれ A と B の間に正の相互作用がある場合に，そして(I3)は劣加法性と呼ばれ A と B の間に負の相互作用がある場合に用いられる．

### 3.3 ファジィ積分

故障診断ではファジィ積分を用いて故障原因の可能性を決める．しかしファジィ測度は一般的に加法性を満たさないため，ルベグ積分をそのまま用いることができない．このため，ファジィ測度に対する積分として菅野積分やショケ積分等が用いられている．ここでは次式で定義されるショケ積分を用いる<sup>[6]</sup>．

$$(C) \int_X h(x) dg = \sum_{i=1}^n (h(x_i) - h(x_{i-1})) \cdot g(A_i) \quad (3.12)$$

ここで， $A_1=X, A_i=\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}, h(x_1) \leq \dots \leq h(x_i) \leq \dots \leq h(x_n), h(x_0)=0, x_0 \notin X$  とする．

故障原因の可能性は多段ショケ積分<sup>[10]</sup>で得られる．先ず振動データの 3 つの領域と振動の方向性についてショケ積分が行われる．次にこれらの結果をもとに次段のショケ積分が行われて可能性が求まる．

## 4. システムの構成及び評価

### 4.1 システムの構成

開発した故障診断システムの構成を図 4 に示す．先ず診断対象である機器についてクリスプ診断を行う．クリスプ診断では機器の構造等に基づいて，発生し得ない故障原因を除外する．この結果残った故障原因に対してファジィ診断を行い，各故障原因の可能性を求めて出力する．

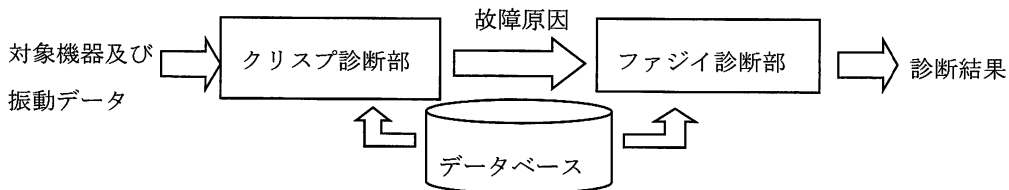


図 4 故障診断システムの構成

## 4.2 評価

例として、回転機器（電動機）に生じた異常振動を診断する場合について評価する<sup>[9]</sup>。ここでは正しい診断結果である異常振動の他に、誤診に相当するアンバランスとミスアライメントの可能性を求めて比較する。またファジイ測度の効果を示すために、相互作用係数が0の場合の可能性（加重平均）を併せて示す。

異常振動の診断に用いるスペクトルは 1N（回転周波数成分）、2N（2倍高調波成分）、及び 3MN（3倍以上の高調波成分）の3種類である。速度域におけるこれらの重視度は診断技術者によって決められている。これを次の表に示す。

$w_{1N}$	$w_{2N}$	$w_{3MN}$
0.6	0.2	0.2

兆候マトリクスで決まるメンバーシップ関数から得られた、各スペクトルの適合度を次に示す。

$h(s_{1N})$	$h(s_{2N})$	$h(s_{3MN})$
0.864	0.809	0.790

被測定データから得られたこれらのスペクトル同士の偏相関係数を次の表に示す。

$k_{1N,2N}$	$k_{1N,3MN}$	$k_{2N,3MN}$
0.572	0.843	0.330

これらの値を用いて得られた各故障原因の可能性を次のグラフに示す。

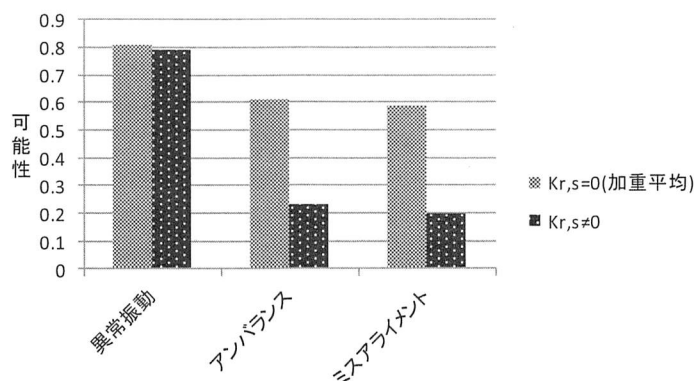


図5 故障原因の可能性

図5からわかるように、実際に生じている異常振動の可能性は何れの場合もほぼ0.8であるが、誤診に相当するアンバランスとミスアライメントの可能性は加重平均の場合でほぼ0.6と低くなっている。特に相互作用係数がゼロでない場合には、両者の可能性がほぼ0.2となっており低く抑えられている。

## 5. まとめ

従来の回転機器故障診断システムの問題点であった、扱える故障原因の数が少ないことや診断精度の不足等に対処するために、確定的な判断をクリस्प診断で行い、診断技術者

の経験等に基づく曖昧さを含む判断をファジイ測度とファジイ積分で実現する故障診断システムを開発した。また、このシステムを回転機器（電動機）の異常振動の診断に適用した例を用いて評価した。その結果ファジイ測度とファジイ積分を用いた場合には、従来の加重平均に比べて誤診の可能性を大幅に差別化することが出来た。しかし、メンバーシップ関数や重視度の値は兆候マトリクスを作成する診断技術者に委ねられているため、診断精度を更に向上させるためには、これらの値の決定方法について検討を進める必要がある。また、近年急速に発展している機械学習を取り入れた診断方法についても検討を行う必要がある。

## 謝辞

故障診断システムのプログラム作成やシステムの評価に精力的に取り組んだ、新潟工科大学電子計算機研究室の学部卒業生並びに大学院修了生に深く感謝する。

## 文献

- [1]豊田利夫：最新の設備診断技術の動向と事例の紹介；プラントエンジニアリング，32(3)，pp.2-5，2010.
- [2]Palade, V., Bocaniala, C.D., Jain, L. : Computational Intelligence in Fault Diagnosis ; Springer, 2006.
- [3]Liu, X., Ma, L. and Mathew, J. : Rotating machinery fault diagnosis on fuzzy data fusion techniques ; 2nd World Congress on Engineering Asset Management and the 4th International Conference on Condition Monitoring, pp. 1309-1318, Harrogate England, 2007.
- [4]井上紀明：振動法による設備診断；日本プラントメンテナンス協会，2011.
- [5]Tsunoyama, M., Masumori, K., Hori, H., Jinno, H., Ogawa, M. and Sato, T. : An Application of Fuzzy Measure and Integral for Diagnosis of Rotating Machinery Faults ; ICFC 2010, International Conference on Fuzzy Computation, pp. 120-124, 2010.
- [6]菅野道夫，室伏俊明：講座ファジイ第3巻 ファジイ測度；刊工業新聞社，1993.
- [7]多屋優人，室伏俊明：評価値に基づく相互作用を考慮したブートストラップ型主観的評価モデル；日本知能情報ファジイ学会誌，pp.47-56，2007.
- [8]Tsunoyama, M., Imai, Y., Hori, H., Jinno, H., Ogawa, M. and Sato, T. : An Application of Fuzzy Measure and Integral to Diagnosis Utilizing Knowledge of Skilled Engineers ; PRDC 2012, Pacific Rim Dependable Computing, 2012.
- [9]Tsunoyama, M., Imai, Y., Hori, H., Jinno, H., Ogawa, M. and Sato, T. : Identification of Fuzzy Measure for Machinery Fault Diagnosis ; FCTA 2013, International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications, pp. 120-124, 2013.
- [10]室伏俊明：多段 Choquet 積分；日本知能情報ファジイ学会誌，pp.319-327，2004.