ウェーブレット解析とファジィ理論を用いた 軸受部劣化診断のための潤滑油中摩耗粒子識別

正員 内海 眞志 (大阪大学)

正員 河崎 善一郎 (大阪大学)

正員 松浦 虔士 (大阪大学)

正員 川田 昌武 (名古屋工業大学)

Discrimination of Wear Particle in Lubricating Oil to Diagnose the Bearing
using Wavelet Transform and Fuzzy Systems Theory

Shinji Utsumi*, Member, Zen-ichiro Kawasaki*, Member, Kenji Matsu-ura*, Member
Masatake Kawada**, Member
(* Osaka University, **Nagoya Institute of Technology)

Ferography analytical method is required to detect the wear particles in the lubricating oil automatically, because in the customary way it is involved a sacrifice of a great deal of time. We propose a new method to detect the wear particles in the lubricating oil to diagnose the bearing by means of local spatial frequency analysis using Wavelet Transform. Gabor function and cylindrical Gabor function are used as the mother function of Wavelet Transform in this paper. Gabor function is effective to detect the particles which distribute along the line of magnetic force on the Ferogram slide. Cylindrical Gabor function can detect the circular particles. And to discriminate the particles, we apply the Fuzzy Systems Theory to the image transformed by two Gabor function and show the effectiveness of this method.

キーワード: フェログラフ分析法, 摩耗粒子, ウェーブレット変換, Gabor 関数, ファジィ論理, メンバシップ関数

1. まえがき

今日における家庭・産業・社会などの様々な分野での高度化・情報化・多様化に伴い, 故障などにより電力供給が停止したときの社会的な影響は大きくなっており, 電力の質に対する要請は今後一層厳しくなっていくものと予想され, 良質な電力を安定に供給するための設備の劣化診断技術の確立が強く望まれている。特に, 回転機等における軸受の故障は長期間の運転休止を余儀なくされることから, 重要な診断箇所となっている⁽¹⁾。

従来, 軸受の劣化診断は設備を停止・分解して診断するという形式で行われてきた。停止中診断の長所は, 対象設備が系統から切り離されているため試験条件の設定などにおいて比較的自由度が高く, 重点的かつ多角的に

診断できることにあるが, 停止試験には多くの時間・コスト・労働力を要し, また, 数年のインターバルをおいて行われるため, その期間において故障が起こった場合, 対処法がないという問題点がある。そのため, 運転中に軸受の劣化・異常の予兆を即座に検出して, 経年的な劣化状態を的確に把握することを目的とした診断技術が必要となってきた⁽²⁾⁽³⁾。

回転機の異常振動・回転数の低下・焼付きといった軸受の故障は, 面圧や摩擦面温度の上昇, 異物の混入, 回転面の突起などにより発生する異常摩耗粒子の増加や成長によって回転面の摩擦が阻害されることで起こる現象である⁽⁴⁾。そのため, 潤滑油中に含まれる摩耗粒子を解析することにより劣化診断を行うフェログラフ分析法が注目されている。この診断法は運転中診断が可能であり, また他の方法では発見し得ない損傷形態を検出できるこ

とから有効な故障予知法とされている⁽⁵⁾。

しかしながら、フェログラフ分析法は摩耗粒子の種類・個数・面積の評定を光学顕微鏡による分析官の目視により計測し、これらを劣化状態の判定基準としていることから、欠陥の有無を判定するにはかなりの経験を必要とする。分析官の不足、疲労による誤診、診断時間の短縮等を解決するため、フェログラフ分析法で得られた摩耗粒子データを CCD カメラを用いてコンピューターに取り込み、画像処理を用いて識別する手法を提案する。

筆者らは固定閾値法による 2 値化による手法の報告を以前に行ったが⁽⁶⁾、フェログラフ分析法で検出される摩耗粒子の種類は 12 種類と多く、また、粒子の検出結果は機器の診断に大きな影響を及ぼすことから、本論文では別体系での画像処理手法を提案する。本論文で提案する画像処理手法は、粒子の種類による形状の相違と、フェログラフ分析法の特徴である磁場による特定粒子の周期的配列、すなわち、粒子配列の空間周波数に着目し、摩耗粒子画像を空間周波数領域に変換、解析することで粒子の識別を行うものである。

画像の周波数解析法としてフーリエ変換が挙げられるが、フーリエ変換の基底関数である振動関数は画像全体に広がる関数であるため、得られるスペクトルは他粒子や粒子間のもつ周波数成分の影響を受ける⁽⁷⁾。そこで本論文では局所的な空間周波数解析を可能とするウェーブレット変換を適用した。なお、ウェーブレット変換の基底関数として、空間的な広がり周波数成分の広がりとの積が最小となる Gabor 関数と円柱型 Gabor 関数 (Gabor 関数を原点を中心に回転させて積分した関数) の 2 種類の基底関数を用いた⁽⁸⁾。具体的には、方向性のある粒子に対しては Gabor 関数を、円形の粒子に対しては円柱型 Gabor 関数を用いたウェーブレット変換により摩耗粒子を画像中から切り出すこととした。

摩耗粒子の識別方法としては、分析官が粒子の色合いや形状等に基づいて粒子の識別を行っていることから、ウェーブレット変換により切り出した粒子の輝度、彩度、色相および、著者らが本論文にて新たに定義した円形度 (円柱型 Gabor 関数を用いたウェーブレット変換画像における粒子の極大値と、同一座標での Gabor 関数を用いたウェーブレット変換値との比) を識別のための特徴量とし、ファジィ理論を用いて、これらの特徴量から粒子の識別を行うこととした。

なお、2 章においてウェーブレット変換を用いた解析法及び、摩耗粒子の検出結果を示す。そして、3 章においてファジィ理論による摩耗粒子の識別法及び、その識別結果を示すとともに、本手法の有効性を示す。

2. ウェーブレット解析による摩耗粒子検出

< 2・1 > 基底関数 フェログラフ分析法において、検出摩耗粒子は一般的に画像に対して局所的に存

在している。そのため、周波数による粒子画像解析を行うためには、基底関数も局在したものでなければならない。本論文では局所的な空間周波数解析を可能とするウェーブレット変換を用いた空間周波数解析法による粒子検出を提案する。なお、ウェーブレット変換の基底関数として、空間的な広がり周波数成分の広がりとの積が最小となる Gabor 関数と円柱型 Gabor 関数 (Gabor 関数を原点を中心に回転させて積分した関数) の 2 種類の基底関数を用いる⁽⁸⁾。すなわち、摩耗粒子を 2 つに分類し、正常摩耗粒子や黒色酸化粒子等の方向性のある粒子に対しては Gabor 関数を、赤錆粒子や非鉄金属系粒子等の円形に近い粒子に対しては、円柱型 Gabor 関数を用いたウェーブレット変換により摩耗粒子を画像中から検出する。以下に 2 種類の基底関数について述べる。

Gabor 関数は調和振動を空間的に局在させるためにガウス関数を窓とした関数であり^{(9)~(15)}、本論文では

$$g(x, y, \sigma_i, u_i) = \kappa e^{-\frac{1}{4\sigma_i^2}(x+y)^2} e^{ju_i x} \quad (1)$$

と定義する。但し、

$$\kappa = \frac{1}{4\pi^2 \sigma_i^2} \quad (2)$$

とする。ここで u_i は中心周波数であり、 σ_i はスケールパラメータである。ここで、 u_i と σ_i は次式の関係で結ばれる。

$$u_i \sigma_i = k \quad (k \text{ は } i \text{ に無関係な定数}) \quad (3)$$

これは、中心周波数と位置検出精度の積が一定であることを意味しており、また同時に、中心周波数によらずガウス窓の中での有効な波数が一定であることも意味している。

摩耗粒子画像 $f(x, y)$ の Gabor 関数 $g(x, y, \sigma_i, u_i)$ を基底関数とするウェーブレット変換は、

$$w_g(x, y, \sigma_i, u_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') g(x-x', y-y', \sigma_i, u_i) dx' dy' \quad (4)$$

で示され、ウェーブレット変換画像 $w_g(x, y, \sigma_i, u_i)$ を得る。この変換画像 w_g の値が大きい場合、方向性のある粒子を検出したことを意味する。

一方、円柱型 Gabor 関数は式(1)で示した Gabor 関数を原点を中心として回転方向に $[0 \sim \pi]$ まで積分したものであり、本論文では、

$$h(r, \theta, \sigma_i, u_i) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi g(r, \theta', \sigma_i, u_i) d\theta' \\ = \kappa e^{-\frac{r^2}{4\sigma_i^2}} J_0(u_i r) \quad (5)$$

と定義する。ここで、 r および θ は画像の極座標表示で

あり、 J_0 は第 1 種 0 次のベッセル関数とする。なお上記と同様に、 u_i は中心周波数、 σ_i はスケールパラメータであり、

$$u_i \sigma_i = k \quad (k \text{ は } i \text{ に無関係な定数}) \quad (6)$$

が成立している。

摩耗粒子画像 $f(x, y)$ の円柱型 Gabor 関数 $h(x, y, \sigma_i, u_i)$ (直交座標表示) を基底関数とするウェーブレット変換は、

$$\begin{aligned} w_h(x, y, \sigma_i, u_i) \\ = \iint f(x', y') h(x - x', y - y', \sigma_i, u_i) dx' dy' \end{aligned} \quad (7)$$

で示され、ウェーブレット変換画像 $w_h(x, y, \sigma_i, u_i)$ を得る。この変換画像 w_h の値が大きい場合、円形の粒子を検出したことを意味する。

図 1 に Gabor 関数 $g(x, y, \sigma_i, u_i)$ と円柱型 Gabor 関数 $h(x, y, \sigma_i, u_i)$ の一例を示す。同図より、Gabor 関数は水平方向 (x 方向) の周波数成分を検出する (方向性がある粒子を検出する) 関数であり、一方、円柱型 Gabor 関数は水平、垂直両方向の周波数成分を検出する (円形である粒子を検出する) 関数であることが分かる。

< 2・2 > 解析アルゴリズム 図 2 に解析アルゴリズムを示し、以下において説明する。CCD カメラからコンピューターに取り込まれた摩耗粒子画像の R 信号 $r(x, y)$ 、G 信号 $g(x, y)$ 、B 信号 $b(x, y)$ のそれぞれに対して、メディアンフィルターを用いて雑音を除去した後、各画素毎に輝度値を算出し、輝度信号画像 $f(x, y)$ を求める。本論文において用いる画像サイズは $512 \times 512[\text{Pixel}]$ の各色 256 階調とする。背景色は既知であることから、 $r(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $b(x, y)$ の閾値の上限値、下限値を用いて、背景色ならば $f(x, y) = 0$ とする。 $r(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $b(x, y)$ のそれぞれを用いて解析を行うことも考えられるが、輝度信号画像 $f(x, y)$ に対してウェーブレット変換を行い、その変換値により摩耗粒子の検出を行うこととする。

なお、ウェーブレット変換は基底関数と画像 $f(x, y)$ との各空間周波数成分ごとの実空間領域における畳込み積分と考えられ、演算回数の低減を考慮した場合、ウィナー・ヒンチンの定理 (Wiener-Khintchine Theorem) により空間周波数領域における積として処理することが有効であることから、本論文では輝度信号画像 $f(x, y)$ に対して高速フーリエ変換を行い、得られた空間周波数画像 $F(u, v)$ に対して、画像中の粒子が方向性を持つ粒子である場合には Gabor 関数 $g(x, y, \sigma_i, u_i)$ を高速フーリエ変換した $G(u, v, \sigma_i, u_i)$ を、方向性を持たない円形粒子である場合には円柱型 Gabor 関数 $h(x, y, \sigma_i, u_i)$ を高速フーリエ変換した $H(u, v, \sigma_i, u_i)$ との積を求める。すなわち、

(a) Gabor 関数

(a) Gabor function

(b) 円柱型 Gabor 関数

(b) Cylindrical Gabor function

図 1 基底関数

Fig.1 Basis of wavelet

$$\begin{aligned} W(u, v) &= F(u, v) \cdot M(u, v) \\ M(u, v) &= G(u, v, \sigma_i, u_i) \text{ or } H(u, v, \sigma_i, u_i) \end{aligned} \quad (8)$$

を行う。

なお、Gabor 関数 $g(x, y, \sigma_i, u_i)$ のフーリエ変換 $G(u, v, \sigma_i, u_i)$ は、

$$\begin{aligned} G(u, v, \sigma_i, u_i) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y, \sigma_i, u_i) e^{-j(ux+vy)} dx dy \\ &= e^{-\pi \sigma_i^2 \left\{ (u-u_i)^2 + v^2 \right\}} \end{aligned} \quad (9)$$

であり、円柱型 Gabor 関数 $h(r, \theta, \sigma_i, u_i)$ のフーリエ変換 $H(\rho, \phi, \sigma_i, u_i)$ は、

$$H(\rho, \phi, \sigma_i, u_i) = e^{-\pi \sigma_i^2 (u_i^2 + \rho^2)} J_0(2\pi \sigma_i^2 u_i \rho) \quad (10)$$

である。ここで、 I_0 は第1種0次の変形ベッセル関数であり、 (ρ, ϕ) は周波数の極座標表示を意味する。なお、本アルゴリズムでは、この $H(\rho, \phi, \sigma_i, u_i)$ を直交座標系に変換し $H(u, v, \sigma_i, u_i)$ として取り扱う。

そして、式(8)により求められた空間周波数領域におけるウェーブレット変換画像 $W(u, v)$ を逆フーリエ変換することにより、実空間領域におけるウェーブレット変換画像 $w(x, y, \sigma_i, u_i)$ を求めることができる。このことは、各点 (x, y) における各空間周波数成分 (u_i) の画像を求めることができることを意味している。

< 2. 3 > 解析結果

実際にフェログラフ分析法により得られた摩耗粒子画像の解析を行う。なお本節では、2種類の基底関数の特徴を示すために、方向性のある粒子の画像に対しては Gabor 関数を、円形の粒子の画像に対しては円柱型 Gabor 関数を分けて用いる。

図3に示す摩耗粒子は正常摩耗粒子であり、方向性を持っており、かつ、周期的な分布形態となっている。Gabor 関数のパラメーターとして $u_i=0.23$, $\sigma_i=5.15$ ($k=1.2$, 任意) を用いて解析を行った結果を図4に示

す。同図より方向性を持った粒子が強調されていることが分かる。すなわち、Gabor 関数を基底関数とするウェーブレット変換により、方向性を持つ粒子の検出が可能であるといえる。

方向性を持たない円形粒子の一例として、図5に示すホワイトメタルの粒子画像を用いる。ここで、円形粒子の粒子半径は未知であることから、複数の中心周波数による円柱型 Gabor 関数を用いることで解析を行う。円柱型 Gabor 関数のパラメーターとして表1に示し、中心周波数 0.048, 0.06, 0.08, 0.12 としたときの解析結果を図6に示す。同図より、円形粒子の強調、検出が可能であることが分かる。

フェログラフ分析法において、粒子サイズは機器の劣化状態を示す情報となることから、それぞれの円柱型 Gabor 関数によるウェーブレット変換画像を比較することで粒径解析を行う。表2に各粒子部分における変換画像の極大値を示す。同表より、粒子Aは粒子半径 50[Pixel] (中心周波数 0.048) で極大値 (20.79) が最大値となっており、この値は実測値と一致する。同様に、粒子B、粒子Cの粒径は 15[Pixel]であると決定することができる。すなわち、本手法により粒子の大きさを求め得ることが分かる。

図2 画像処理アルゴリズム

Fig.2 The algorithm of image processing

図3 輝度信号画像 (正常摩耗粒子)

Fig.3 The original image

図4 Gabor 変換画像

Fig.4 The result using Gabor Transform

図5 輝度信号画像 (ホワイトメタル)

Fig.5 The original image

(a) $u_l = 0.048$ (半径 50) (b) $u_l = 0.06$ (半径 40) (c) $u_l = 0.08$ (半径 30) (d) $u_l = 0.12$ (半径 20)

図6 円柱型 Gabor 変換画像

Fig.6 The results using cylindrical Gabor function

表1 円柱型 Gabor 関数のパラメーター ($k=1.2$)

Table1 The parameter of cylindrical Gabor function

中心周波数 u_l	スケールパラメーター σ_l	粒子半径 [Pixel]
0.044	27.5	55
0.048	25	50
0.053	22.5	45
0.06	20	40
0.069	17.5	35
0.08	15	30
0.096	12.5	25
0.12	10	20
0.16	7.5	15
0.24	5	10

表2 各粒子部分における極大値

Table2 The maximum value at each part of particle

粒子半径 [Pixel]	粒子 A	粒子 B	粒子 C
55	20.50	6.81	-
50	20.79	7.99	-
45	20.24	9.39	-
40	18.50	10.97	5.66
35	17.18	12.71	6.90
30	16.97	14.72	8.76
25	16.06	16.59	11.46
20	15.27	17.95	15.26
15	15.48	18.89	19.24
10	13.93	17.70	17.30

3. ファジ理論による摩耗粒子の識別

フェログラフ分析法では、検出粒子の種類により劣化箇所や原因の推定を行うことから、粒子の識別を行う必要がある。本論文では識別アルゴリズムとしてファジ理論を用いることを提案し、粒子の特徴量として LHS (Luminance: 輝度, Hue: 色相, Saturation: 彩度) 空間における色情報と、著者らが本論文にて新たに定義した円形度 (円柱型 Gabor 関数を用いたウェーブレット変換画像における粒子の極大値と、同一座標での Gabor 関数を用いたウェーブレット変換値との比) を用いることとした。

前章では、2種類の基底関数の特徴を示すために、方向性のある粒子に対しては Gabor 関数を、円形の粒子に対しては円柱型 Gabor 関数を分けて用いたが、本来、判定すべき画像にどちらの粒子が存在するかということは分からないことから、2種類の基底関数によるウェーブレット変換を同一画像に対して行うこととする。

識別法としては、まず、Gabor 関数及び、円柱型 Gabor 関数の2種類の基底関数によるウェーブレット変換を用いて粒子強調を行い、閾値を超えた部分についてラベリングを行う。この処理により、2種類の基底関数によるウェーブレット変換画像が出来る。次に、ラベリングを行った部分について輝度、彩度、色相のヒストグラムを作成し、頻度数が最大となった階級値を特徴量とする。各ヒストグラムの最大値、最小値、階級数を表3に示す。同表により各粒子の LHS 空間におけるマッピングを行う。

本論文では、倍率 500 倍で透過光が緑色、反射光が白色の光学顕微鏡で検出が可能となる粒子として5種類 (正常摩耗粒子、黒色酸化粒子、ホワイトメタル、真鍮、赤錆粒子) を選択した。各粒子のサンプル数を表4に、マッピング結果を図7に示す。なお各粒子のサンプル数の相違は発生頻度に関係しており、サンプル数が少ない粒子は発生頻度が低く、必然的に取得サンプル数が少なく、一方、サンプル数が多い粒子は発生頻度が高く、取得が容易であったことに因っている。

本論文ではファジ理論を用いて粒子の識別を行うことから、図7のLHS特徴空間におけるマッピングをもとに、粒子識別のためのメンバシップ関数^{(16)~(18)}を作成した。図8に色情報である輝度、彩度、色相に関するメンバシップ関数を示す。また、粒子の円形度 (円柱型 Gabor/Gabor) も識別の際には重要な特徴量となることから、円形度に関するメンバシップ関数を作成し、図9に形状に関するメンバシップ関数として示す。なお同図では、円柱型 Gabor/Gabor が小さい場合、方向性を持つ粒子を意味しており、円柱型 Gabor/Gabor が大きい場合、円形の粒子であることを意味する。

表3 輝度、彩度、色相のヒストグラムパラメータ

Table3 The parameter of the histograms				
	最小値	最大値	階級の幅	階級数
輝度	0	255	8	32
彩度	0	255	8	32
色相	0	360	10	36

表4 粒子のサンプル数

Table4 The number of data	
摩耗粒子名	サンプル数 (個)
正常摩耗粒子	339
黒色酸化粒子	132
ホワイトメタル	28
真鍮	15
赤錆粒子	11

図7 LHS 特徴空間におけるマッピング

Fig.7 The feature's map expression of each particle

図8 色情報に関するメンバーシップ関数

Fig.8 The member-ship function of color

図9 形状に関するメンバーシップ関数

Fig.9 The member-ship function of shape

図10 輝度信号画像

Fig.10 The original image

表5 極大値部分における特徴量

Table5 The feature of particles.

粒子番号	輝度	彩度	色相	円形度	半径
1	240	24	160	0.76	25
2	96	24	210	0.86	10
3	112	24	200	0.49	10

表6 粒子1～3の判別結果

Table6 The result of discriminating the particles

粒子番号	正常摩耗	黒色酸化	真鍮	ホワイトメタル	赤錆
1	0.30	0.43	0.53	1.00	0.70
2	0.67	0.43	0.24	0.50	0.50
3	0.78	0.53	0.27	0.39	0.39

図11 粒子の判定結果

Fig.11 The result of analyzing the image

本手法の解析例として図10に示す画像を用いて検出する。同図において、画像中央付近にホワイトメタル(×印1)と、磁力に沿って沈着した正常摩耗粒子(×印2,3)とを確認することができる。すなわち、同画像は方向性を持つ正常摩耗粒子と、円形粒子であるホワイトメタルが存在する画像である。

同画像に対して、円柱型 Gabor 関数によるウェーブレット変換を行った結果、図中に示す×印1～3の位置において極大値を示した。それぞれの位置における特徴量を表5に示す。なお同表における半径は、円柱型 Gabor 関数によるウェーブレット変換の極大値が、最大値を示した際の粒子半径を意味する。また、同画像に対して Gabor 関数によるウェーブレット変換を行い、その結果から円形度(円柱型 Gabor/Gabor)を算出した。

そして、上記の特徴量(輝度, 彩度, 色相, 円形度)を図8, 図9に示す色情報と形状に関するメンバーシップ関数に入力した結果を表6に示す。なお、同表の数値は各特徴量によるメンバーシップ関数の出力値(メンバーシップ値)の平均値を示している。同表より、番号1の粒子はホワイトメタルのメンバーシップ値が最大値1であることから、ホワイトメタルとして正しく識別されている。また、番号2, 3の粒子は、正常摩耗粒子のメンバーシップ値が、それぞれ最大値0.67, 0.78を示していること

から、正常摩耗粒子と正しく識別されていることがわかる。そして、Gabor 関数のウェーブレット変換により同画像中に含まれるすべての正常摩耗粒子の画素数を1512[Pixel]と求め得た。

以上より、同画像は粒子半径 25[Pixel]のホワイトメタルが1個、総面積が 1512[Pixel]の正常摩耗粒子が存在する画像であると図 11 に示すように分析官に提示することができる。よって、本手法は各摩耗粒子の種類を識別するとともに、その粒子の大きさ（画像中の面積）を求め得ることから、フェログラフ分析法を自動化する上で有効であるといえる。

4. むすび

本論文では、フェログラフ分析法の摩耗粒子自動検出システムとして、ウェーブレット解析とファジィ理論を適用する手法を提案し、実際に取得したデジタル画像を用いて解析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

正常摩耗粒子、黒色酸化粒子などの方向性を持った粒子は、Gabor 関数を基底関数としたウェーブレット変換により、粒子検出が行えることを示した。

また、非鉄金属系の粒子など方向性を持たない粒子に関しては、Gabor 関数を回転させた円柱型 Gabor 関数を基底関数としたウェーブレット変換により、粒子検出と同時に粒径を求め得ることを示した。

そして、検出した摩耗粒子の特徴量（輝度、彩度、色相、円形度）をメンバシップ関数に入力することで、摩耗粒子の識別が可能であることを示した。

よって、本手法は各摩耗粒子の種類を識別するとともに、その粒子の大きさ（画像中の面積）を求め得ることから、フェログラフ分析法を自動化する上で有効であるといえる。

今後は、本手法と以前報告した手法との並列処理による信頼性の高い摩耗粒子自動検出システムの開発を行う予定である。

（平成 10 年 3 月 27 日受付，同 10 年 9 月 9 日再受付）

文献

- (1) 電気学会編，“電気設備の診断技術”，(1988)
- (2) 日本潤滑学会編，“潤滑故障例とその対策”，(1978)
- (3) 似内他：“わかりやすい潤滑技術”，日本プラントメンテナンス協会 (1995)
- (4) 野呂瀬他：“フェログラフィーによる軸受損傷過程の追跡”，潤滑，33，pp.533-539 (1987)
- (5) 松本他：“フェログラフィー法による磨耗粒子分析と故障予知”，日本船用機関学会誌，15，5，pp.369-377 (1980)
- (6) 川田他：“画像処理技術とニューラルネットワークを適用したフェログラフィー分析法による同期機す

べり軸受の潤滑油中摩耗粒子検出”，電学論，

Vol.117-B，No.8，pp.1132-1139，(1997)

- (7) 吉川他：“時間一周波数解析の展望 I”，信学誌，Vol.79，No.5，pp.515-520 (1996)
- (8) 中野他：“ガボール関数を用いたカラー液晶ディスプレイのマクロ欠陥検査支援”，信学論，Vol. J80-D-II，No.3，pp.734-744 (1997)
- (9) D. Gabor，“Theory of Communication”，J. Opt. Soc. Am.，vol.A2，pp.1160-1169，(1946)
- (10) M.H. Gross and R. Koch，“Visualization of multidimensional shape and texture features in laser range data using complex valued Gabor wavelets”，IEEE Trans. Vis. & Comput. Graphics，vol.1，no.1，pp.44-59 (1995)
- (11) J. G. Daugman，“Complete desecrate 2-D Gabor transform by neural networks for image analysis and compression”，IEEE Trans. Acoust.，Speech & Signal Process.，vol.36，pp.1169-1179 (1988)
- (12) 河田他：“ガボール展開係数を用いた階層的テクスチャ解析”，信学論 Vol. J78-D-II，No.3，pp.437-444 (1995)
- (13) 山口他：“ウェーブレット解析”，科学 60，pp.398-405 (1990)
- (14) 佐藤他：“ウェーブレット解析の数学的基礎 第 I 部 第 II 部”，日本音響学会誌 47 巻 6 号，(1991)
- (15) C.K.Chui，“ウェーブレット応用”，東京電機大学出版局 (1997)
- (16) 日本ファジィ学会編，“講座ファジィ ファジィ集合”，(1992)
- (17) 日本ファジィ学会編，“講座ファジィ ファジィ画像処理”，(1993)
- (18) 中島他，“ファジィ理論入門” (1994)

内海 眞志

（正員）1973 年 8 月 24 日生まれ。1998 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月株式会社東芝入社。現在，同社通信応用システム部勤務。在学中，電力機器・設備の診断技術，信号処理技術，画像処理技術の応用に関する研究に従事。

河崎 善一郎

（正員）1949 年 1 月 17 日生まれ。1978 年 3 月大阪大学大学院博士課程修了。1979 年 4 月名古屋大学空電研究所勤務。1989 年 7 月大阪大学工学部講師。1991 年同助教授，現在，同大学大学院工学研究科電気工学専攻助教授。工学博士。電磁界理論，環境電磁工学，雷観測，電力機器の絶縁診断に関する研究に従事。1993 年度日本大気電気学会賞受賞。1998

年度電気学会進歩賞受賞。電子情報通信学会，気象学会，日本大気電気学会，高速信号処理応用技術学会，AGU，IEEE 各会員。日本学術会議・電波研連委員。

松浦 虔士 (正員) 1938 年 1 月 1 日生まれ。1962

年 3 月大阪大学大学院修士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。1977 年 1 月大阪大学工学部助教授，1988 年 3 月同大学教授，現在，同大学大学院工学研究科電気工学専攻教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・変換・制御に関する教育・研究に従事。

CIGRE, ITS, エネルギー・資源学会各会員。1995 年 ITA アカデミシアン。

川田 昌武 (正員) 1971 年 1 月 25 日生まれ。1998

年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年 6 月名古屋工業大学工学部システムマネジメント工学科勤務。工学博士。電力機器・設備の診断技術，センシング技術の開発，信号処理・画像処理技術・ニューラルネットワーク・ウェーブレッ

ト解析の応用，環境電磁工学に関する研究に従事。1995 年電気学会論文発表賞受賞。応用物理学会，日本ME学会，高速信号処理応用技術学会の各会員。