Fractal Analysis of Wavy Pattern of Frictional Coefficient of Fabrics

Hiroyuki Fujita*, Kazuhiko Komurasaki*

Takashi Matsuoka** and Kazuhiko Sakaguchi***

*Hyogo Prefectural Institute of Industrial Research, Uenodan, Nomura-cho, Nishiwaki, 677-0054, Japan

**Faculty of Engineering, Doshisha University, Miyakodani, Tatara, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

Abstract

Frequency analysis for a change in frictional coefficient is an important method to elucidate the complicated frictional characteristics of fabrics. The wavy patterns of frictional coefficient have the regular or irregular structure. From the viewpoint of application to the hand value and identification of fabrics, it is also expected to quantitatively evaluate the frequency distribution of wavy patterns of frictional coefficient. A method is proposed, therefore, to evaluate the frequency distribution by using fractal dimension, and the validity of this method is estimated. The results obtained are as follows:

- (1) There is no correlation among the fractal dimensions, MMD and the density of fabrics.
- (2) The frequency distribution of the fabrics composed of staple fiber was different from that of the fabrics made of filament fibers. The fractal property appeared on the wavy patterns of fabrics composed of staple fiber, but the fractal property did not appear on the other case.
- (3) It became clear that the fractal dimensions and the correlation coefficient gave useful information as an evaluation indicator of the hand value in the fabric classification, even if fabrics were not able to be classified by only MMD and MIU obtained from the KES.
- (4) The wavy patterns of the frictional coefficient of fabrics showed a class structure. As a result of simulation on the wavy patterns used the inverse Fourier transform, which was considered the class structure, the simulated wavy patterns on fabrics composed of staple fiber were similar to the experimental results.

Key Words: Wavy Pattern of Frictional Coefficient of Fabrics, Fractal Analysis, Frequency Distribution, Inverse Fourier Transform

(Received Sept. 3, 1998)

(Accepted for Publication Sept. 25, 1999)

布の摩擦係数波形のフラクタル解析

藤田 浩行*, 小紫 和彦*, 松岡 敬**, 坂口 一彦***

1. 緒 言

布の摩擦特性は、布の手触り感覚である風合い値に影響を与え、風合い計測に多く用いられている KES においては、平均摩擦係数 (MIU) および平均偏差 (MMD) が測定されている¹⁾。これらの摩擦特

性は、布の構造形態や摩擦条件 (摩擦速度、荷重および摩擦子の形状など) などにより変化する²⁾。しかし、MIU、MMD は、摩擦係数の波形に含まれた情報を平均化して求めた値であるため、広がりを持つ布としての空間的な情報量としては不十分である。さらに、波形の変化は、布の規則性とランダム

*会員, 兵庫県立工業技術センター, 西脇市野村町上ノ段 1790-496, TEL. 0795-22-2041, FAX. 0795-22-3671

非会員, *会員, 同志社大学工学部機械系学科, 京田辺市多々羅都谷 1-3

性を含んだ構造に起因すると考えられることから、摩擦係数の波形に関して周波数解析を行うことは重要である。周波数解析に関しては、布の構造的な要素と測定条件などと波形に含まれる成分について解析を行った報告がある。鋤柄らは、皮膚がちりめんに触れたときに感じる凹凸感は、織構造の規則正しさよりも突出したうねにより強く感じられ、それは、摩擦係数の波形から得られたパワースペクトルにより明らかになったと報告している³⁾。また、木下らは、新合織布の摩擦係数の波形のパワースペクトルについて、布の表面構造および摩擦子の形状などから検討を行っている⁴⁾。これらの報告から、その波形には、糸の密度に対応する周波数成分や摩擦子の形状に対応した成分などの周波数成分が含まれていることがわかる。しかし、それらの評価は、定性的なものにとどまっている。風合いにおける評価値としての応用や試料の同定などの観点から、新たな定量的評価手法が望まれる。近年、フラクタルの概念は、複雑さの程度を示す指標として様々な分野において利用されている。

そこで、本報告では、摩擦係数の波形についてフラクタル解析を行い、フラクタル次元により、波形の周波数成分の分布を定量化することを提案し、波形のフラクタル性やフラクタル次元と波形の視覚的な複雑さなどとの関係について検討した。また、逆フーリエ変換を利用して、フラクタル解析結果を基に波形の生成シミュレーションを行い、実験波形と比較検討することで、布の摩擦係数波形の特徴についても考察を行ったので報告する。

2. 実験方法

実験に用いた布試料は、染色堅ろう度試験用添付白布 (JISL0803) の毛、絹、綿、レーヨン、ナイロン、ポリエステルおよびアクリルの7種類の平織物である。毛、絹およびアクリルの3種類は、短繊維による紡績糸で構成されており、その他は、長繊維の糸で構成されている。

摩擦試験は、自動表面試験機 KES-FB4AU (カトーテック製) を用いて、摩擦速度 1mm/sec、荷重は摩擦子を含めて 50gf の条件で、20℃、65%RH の環境下で行った。摩擦子は、ピアノ線を 10 本並べた標準仕様のもので、形状は、5mm 角の正方形である。摩擦係数は、A/D 変換器 (12 ビット) を利用して、アナログ信号をデジタル化してコンピュータに入力した。データのサンプリング間隔は、10msec (100

Hz) で、2048 個のデータを入力したため、試料上、20.48mm の範囲を測定したことになる。摩擦試験は、各試料のたておよびよこ糸方向について、各々 3 か所の測定を行った。

なお、本試験機はローカットフィルターを通して MMD を求めるが、本報告ではフィルターは通さずに算出した。

3. フラクタル解析方法

波形のフラクタル次元を求める方法には、その波形を正方形などの有限の大きさを持つ小領域で被覆して、波形を含む小領域の総数と小領域のサイズとの関係から求める Box-counting 法⁵⁾や波形のパワースペクトル密度関数を求め、その周波数とパワースペクトルの関係から求める方法⁶⁾ (以降、スペクトル法と呼ぶ) などがある。Box-counting 法は、機械加工面の表面粗さや破断面などの形状の定量的評価手法として用いられている^{7,8)}。しかし、摩擦係数の波形は、粗さ曲線のように、縦・横軸の単位が同一でないため、Box-counting 法を適用するのは好ましくない。スペクトル法は、波形の周波数分布からフラクタル次元を求める手法であり、機械加工面の表面粗さについて解析した報告がある^{9,12)}。スペクトル法では、以下の方法でフラクタル次元を算出できる。

周波数 f とパワースペクトル $S(f)$ が、(1) 式のような関係にあるとき、

$$S(f) = f^{-\beta} \quad (1)$$

その波形はフラクタル性を有しているといい、べき指数 β からフラクタル次元 D を (2) 式から求めることができる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} D &= 2 & (0 \leq \beta < 1) \\ D &= 1 + (3 - \beta)/2 & (1 \leq \beta \leq 3) \\ D &= 1 & (3 < \beta) \end{aligned} \quad (2)$$

そこで、本研究においては、スペクトル法を用いることとした。

なお、フラクタル次元の算出において、自然界の諸形状、諸現象は、完全なフラクタル性を有するものは存在しないから、その周波数 f と $S(f)$ を両対数座標上にプロットし、最小二乗法により、直線近似したときの傾きを $-\beta$ ((3) 式) とすることで、フラクタル次元を求めた。 C は、定数である。このフラクタル次元により、周波数分布の定量化が可能である。

$$\log S(f) = -\beta \log(f) + C \quad (3)$$

また、波形のフラクタル性は、直線の近似性つまり、 $\log(f)$ と $\log S(f)$ の相関係数により評価が可能であると考えられる。

4. 結果および考察

4.1 パワースペクトル

摩擦係数の波形とそのパワースペクトル密度関数の代表例としてアクリルおよびナイロンをたて糸方向に摩擦したときの結果を図1および図2に示す。図1の横軸は摩擦子の移動距離、縦軸は摩擦係数、図2の横軸は単位長さ(1cm)当たりの波数(周波数)、縦軸はパワースペクトルを意味する。アクリルの波形には、パワーの大きい周波数成分が複数含まれており、よこ糸密度(27.8本/cm)および摩擦子のピアノ線に対応した成分(20.0本/cm)以外にも複数の周波数成分が含まれているのがわかる。一方、ナイロンの波形に含まれている周波数成分は、主に大きな成分が1つだけ含まれており、これは、よこ糸密度(30.0本/cm)にほぼ対応した成分である。よこ糸方向に摩擦したときの波形のパワースペ

Fig. 2 Power spectra of the frictional coefficient (a)Acrylic (Warp), (b)Nylon (Warp)

Fig. 1 The frictional coefficient of fabrics measured by the KES (a) Acrylic (Warp), (b) Nylon (Warp)

クトルもたて糸方向と同様な傾向を示した。

毛および綿の波形はアクリルと同様に、パワーの大きな周波数成分を複数含んだパワースペクトルとなり、絹、レーヨンおよびポリエステルはナイロンと同じように繊維密度に対応した周波数成分が極端に大きくなる分布を示した。この差の要因として、構成する糸が前者が短繊維、後者は長繊維であることから、繊維長の差による糸表面の毛羽の挙動の違いなどのランダム性に起因したものと考えられる。

4.2 フラクタル解析

図3に、図2の横軸および縦軸の両対数を取り、プロットした図を示す。図3(a)のパワースペクトルは、横軸が1.2付近を境界として、パワーの傾きが異なり、領域Ⅰおよび領域Ⅱに分類できる。また、図3(b)のパワースペクトルは図3(a)のように明確ではないが、横軸が1.7~1.8付近を境界として2つの領域ⅠとⅡに分類が可能である。つまり、これらの波形のパワースペクトル密度関数は、ある値を境界として、(1)式の β が異なる階層的な構造を有していると考えられ、フラクタル解析を行うには、この2つ

Fig. 3 The logarithm of power spectra
(a) Acrylic (Warp), (b) Nylon (Warp)

の領域を各々直線近似することにより行う必要があると考えられる。

一方、パワースペクトルは高周波数になるほど不安定となる傾向がある。また、高周波数領域での計測機の応答性の点などを考慮すれば、高周波数の成分ほどノイズが多く含まれていると考えられる。

そこで、計測におけるノイズ成分について検討を行うこととした。自動表面試験機における摩擦力の測定は、摩擦子に加わる接線力を差動トランスにより検出している。ノイズの測定は、この摩擦子を外した状態で計測機を動作させ、その状態における摩擦力に相当する出力電圧を計測することにより行った。得られた出力電圧を摩擦係数に相当する値に換算し、そのパワースペクトル密度関数を図4に示す。パワースペクトルは、横軸が1以上の領域では、約-3を中心とした値で変動するとともに、2.3付近に特に大きなパワーを持つ分布を示している。図4と図3を対比すると、横軸が2よりも小さい領域ではノイズのパワーは摩擦係数のパワーの100分の1以下と小さくなっており、摩擦係数波形に含まれるノイズ成分は少ないと考えられる。しかし、横軸が2よりも大きな領域では、波長が短くなるほど摩擦係数波形のパワーが低下することから、パワーの差は小さくなり、2.5付近ではノイズのパワーは摩擦

Fig. 4 The logarithm of power spectrum of wavy pattern for the noise

係数波形の10分の1ぐらいの大きさである。また、横軸が2.3付近にノイズと考えられる大きなパワーが摩擦係数波形にも含まれるのが確認できる。以上の結果から、フラクタル解析を行う周波数領域の上限を2.0 ($f=100\text{cm}^{-1}$) とすることとした。摩擦係数波形は図2で示したように、織密度に相当する周波数付近にパワーが極めて大きな成分を含み、その周波数以上ではパワーが大きく低下する傾向を示す。また、波形には布のしわや厚さむらなどによる波形のうねり成分も含まれ、その波長は数分の1mmから10mm程度であると考えられる。したがって、摩擦係数波形の構造に関する成分は、織密度に相当する波長付近から、上限値と決定した波長が0.1mmくらいまでに主に含まれていると考えられ、この波長領域でフラクタル解析を行うこととした。つまり、図3における領域IVがフラクタル解析を行う波長領域である。なお、パワースペクトルは、波形の特徴を明確にするため、平滑化は行っていない。

図3(a)のスペクトルでは、よこ糸の織密度に相当する波長付近の値を境界値として2つの領域IとIIに分類できる。領域Iは布のしわや厚さむらなどによる波形のうねり成分を含む周波数領域であり、領域IIは高い周波数領域でノイズ成分を多く含んでいる。領域IとIIの境界値はフラクタル解析を行う領域IVの低い周波数側の値と一致し、これはその他の短繊維試料でも同様であった。一方、図3(b)のスペクトルの領域IとIIの境界値は、よこ糸の織密度に相当する周波数よりかなり大きい値を示したが、この値はノイズ成分に大きく影響されていると考えられる。つまり、領域IIにおいて直線近似して求めたフラクタル次元は、波形の主要な波長成分を解析したものでないこととノイズを多く含んだ領域での解析であるため、数値の信頼性は低いと思われる。こ

れは、その他の長繊維試料についても同様なことがいえる。図 3(a), (b)の領域Ⅳを近似した直線を太い実線で示す。この直線の傾きが、(3)式の β に相当する。すべての波形についてフラクタル解析を行い、波形のフラクタル性およびフラクタル次元の定量的な評価値としての有効性などについて以下のとおり検討する。

表 1 に、各試料のフラクタル次元、近似直線の傾き β 、近似直線の相関係数および MMD の平均値を摩擦方向ごとに示す。短繊維試料の近似直線の相関係数は、0.662 以上と長繊維試料と比較して大きな値を示し、領域Ⅳでのスペクトルはフラクタル性を有すると考えられる。一方、長繊維試料の相関係数は、0.230~0.557 と短繊維に比べると小さな値を示し、これらの波形のスペクトルはフラクタルでないと考えられるが、レーヨンは比較的大きな値を示した。また、近似直線の傾きが 3 以上となり、フラクタル次元が 1 となった試料がいくつかあった。この傾きは、フラクタル次元とは負の比例関係にあることから、スペクトルの特徴量として利用でき、波形の詳細な解析においては重要な値になると考えられる。

近似直線の傾き β と相関係数の関係を図 5 に示す。黒く塗りつぶされた印は短繊維、白抜きおよび×印は長繊維による試料である。前述したとおり、短繊維および長繊維の試料間で明らかに相関係数が異なるのがわかる。長繊維の波形の特徴は、図 2(b)

のような極めて大きなパワーを持つ成分およびその周波数の 0.5, 2, 3, ・ ・ 倍の周波数以外にはパワーをほとんど有しないような高い周期性を表すパワースペクトルとなる。したがって、図 3(b)は、それらの周波数に対応したパワーが、極端に大きな値を示しながら変動しており、そのために、相関係数は小さくなる傾向を示したと考えられる。一方、短繊維のパワースペクトルには、織密度に対応した周波数成分以外にもパワーの大きな周波数成分を複数含むことから、図 3(a)のとおり、顕著に振動する周波数成分は少ない分布を示したため、相関係数は大きくなったと考えられる。このように短繊維および長繊維の試料間で相関係数が異なったのは、構成する糸の繊維長による織物表面の繊維の挙動が、波形の周期性に影響を与えたためと考えられる。また、短繊維および長繊維の試料内で近似直線の傾きと相関係数には比例関係が見られた。

図 5 のとおり長繊維試料の相関係数は短繊維試料に比べて小さな値を示したが、その値は広い範囲に分布している。相関係数は、波形の周期性により変化すると考えられ、相関係数が異なれば、視覚的に波形が異なることが予想される。そこで、相関係数が大きな値 (0.536) を示したナイロン (よこ) (図 5 参照) のスペクトルと小さな値 (0.196) を示した絹 (たて) (図 5 参照) のスペクトルを図 6 に示す。相関係数の小さな絹のスペクトルはナイロンと比較して、解析領域内においてパワースペクトルが非常

Table 1 Fractal analysis of wavy pattern of the frictional coefficient of fabrics

		Wool	Silk	Cotton	Polyester	Acrylic	Nylon	Rayon
W a v y	Fractal Dimension (Slope β)	1.208 (2.585)	1.912 (1.177)	1.036 (2.929)	1.841 (1.319)	1.078 (2.844)	1.744 (1.512)	1.409 (2.183)
	Coefficient of Correlation	0.662	0.230	0.663	0.250	0.711	0.292	0.557
	MMD	0.0195	0.0478	0.0265	0.0216	0.0228	0.0239	0.0189
W e f f	Fractal Dimension (Slope β)	1.000 (3.315)	1.854 (1.292)	1.000 (3.723)	1.573 (1.854)	1.000 (3.205)	1.000 (3.143)	1.224 (2.552)
	Coefficient of Correlation	0.781	0.363	0.790	0.338	0.729	0.469	0.466
	MMD	0.0222	0.0114	0.0321	0.0272	0.0299	0.0157	0.0405

Fig. 5 Relation between slopes of the line fitted power spectrum and correlation coefficient between the frequency and power spectrum

Fig. 6 Comparison of the logarithm of power spectra for the wavy patterns (a) Nylon (Weft), (b) Silk (Warp)

に激しく変動しており、そのため相関係数は小さな値を示した。両者の摩擦係数波形を図7に示す。視覚的に比較しやすいよう、縦軸の尺度を変化させて表示している。絹の波形はナイロンと比べて、その振幅は比較的安定し、規則正しい変動を繰り返している。つまり、高い周期性を有する波形ほど、相関係数は小さくなると考えられ、短繊維と長繊維の試料間の相関係数の違いの要因と同様であった。

フラクタル性を示す場合、フラクタル次元は波形

の複雑さの程度を示す指標となる。そこで、フラクタル次元が小さな値 (1.000) を示した綿 (よこ) (図5参照) と大きな値 (1.264) を示したアクリル (たて) (図5参照) の波形を図8に示す。アクリルの波形は綿と比べて視覚的な複雑さの度合いが大きい。フラクタル次元は大きいほど複雑さの度合いは増大するが、アクリルのフラクタル次元の方が大きくな

Fig. 7 Comparison of the visual feature of the wavy patterns for the frictional coefficient (a) Nylon (Weft), (b) Silk (Warp)

Fig. 8 Comparison of the visual feature of the wavy patterns for the frictional coefficient (a) Cotton (Weft), (b) Acrylic (Warp)

ったことは、視覚的な複雑さ度合いと一致したことになる。

図9にフラクタル次元とMMDの関係を示す。その結果、両者には相関関係は見られなかった。これは、MMDが波形の振幅により変化する特徴量で、平均値からのばらつきの程度を示す値であるためである。つまり、フラクタル次元は(3)式のとおり、周波数とパワースペクトルの相対的な関係から求めるものであるから、MMDとは異なった波形の特徴を表していると考えられる。

フラクタル次元と織密度の関係について検討する。摩擦子の形状から、たて糸方向の摩擦はよこ糸密度に、よこ糸方向の摩擦はたて糸密度に影響される²⁾。そこで、たて糸方向に摩擦した試料はよこ糸密度を、よこ糸方向に摩擦した試料はたて糸密度を縦軸にし、フラクタル次元との関係を示したのが図10である。その結果、両者には相関関係は見られなかった。

以上の結果から、フラクタル性の程度を示す相関

係数およびフラクタル次元は、摩擦係数波形の特徴を定量化した評価値として有効であることが確認できた。これらは、MIUやMMDとは全く異なった評価値であることから、試料の分類や同定などに役立つと考えられる。また、短繊維と長繊維の試料間で相関係数が異なる傾向を示したことなどからも、触感の新たな評価値としての可能性もあり、これについては官能検査などを行うことなどによる有効性の検討が必要である。さらに、織物の摩擦係数波形は、組織や糸の太さなどの構造的な特徴に影響を受けて変化すると考えられことから、構造的な特徴とフラクタル次元などの関係について検討することも今後の課題である。

4.3 摩擦係数波形の生成シミュレーション

4.2では摩擦係数波形のフラクタル性やフラクタル次元について検討し、短繊維試料と長繊維試料間においてフラクタル性の指標である相関係数が異なる傾向を示すことがわかった。また、フラクタル性を有すると考えられる短繊維試料の摩擦係数波形のパワースペクトル密度関数は、低周波数領域（領域Ⅰ）および高周波数領域（領域Ⅱ）の2つのエリアに分割することが可能であり、階層構造を有していると考えられた。

そこで、短繊維試料および長繊維試料のフラクタル性やパワースペクトルの階層的な構造が波形の特徴にどのように影響を与えるか検討するために、フラクタル解析結果から摩擦係数波形を生成させるシミュレーションを行った。

波形は、実験波形のフラクタル次元を基に、逆フーリエ変換を利用して生成シミュレーションを行い、実際の波形との比較・検討を行った。シミュレーション方法について以下に述べる。

不規則変動を表すモデルとして、非整数ブラウン運動 $B_H(t)$ がある。本シミュレーションでは、非整数ブラウン運動を用いて不規則変動曲線を発生させた。これは、変数を t とし、 $0 < H < 1$ の値をとるパラメータ H によって特徴づけられ、正の任意のスケール a に対して(4)式が成り立つものである¹¹⁾。

$$B_H(t+\tau)-B_H(t)$$
$$=a-H\{B_H(t+at)-B_H(t)\}$$

(4)

なお、フラクタル次元 D は、パラメータ H と(5)式の関係がある。

$$D=2-H$$

(5)

この $B_H(t)$ は、係数 Ca を用いて、(6)式のように、

Fig. 9 Relation between fractal dimensions and MMD

Fig. 10 Relation between fractal dimensions and density of fabrics

逆フーリエ変換により表すことができる¹²⁾。なお、 f は周波数である。

$$B_H(t) = \int Ca \exp(j2\pi ft) df \quad j = \sqrt{-1} \quad (6)$$

(6)式の係数 Ca には、波形の振幅の大きさに対応する項 k 、 β のべき乗で減衰する項 $f^{-\beta}$ 、そして不規則性を導入するために乱数である r を導入した。

$$Ca = kf^{-\beta} \exp(j2\pi r) \quad (7)$$

なお、乱数 r は、0～1 の範囲の一樣乱数とした。以上の方法で、不規則変動曲線を発生させた。

シミュレーションの対象とした波形は、アクリルとナイロンをたて糸方向に摩擦した図1に示す2つの波形とした。シミュレーションでは、布の摩擦係数波形の特徴について検討を行うため、階層構造を考慮しないシミュレーションと階層構造を考慮したシミュレーションの2種類について行った。階層構造を考慮したシミュレーションのフラクタル次元は、波形のうねり成分に相当する波長領域（領域Ⅲ）とフラクタル解析を行った領域Ⅳを直線近似することで求めたフラクタル次元を用いた。なお、領域Ⅳよりも波長の短い領域については、領域Ⅳを近似した直線の傾きでパワースペクトルが分布するとした。各領域を近似した直線を図3に実線で示す。また、階層構造を考慮しない場合は、領域ⅢおよびⅣの2つの領域を近似した点線の直線（図3参照）の傾きから求めたフラクタル次元を用いた。なお、フラクタル次元が2の場合は、各近似直線の傾き β を利用してシミュレーションを行った。それらの値および階層構造の境界周波数は、表2のとおりである。

図11にアクリルの波形について、実験結果から得られた表2の数値を基にシミュレーションを行った

Fig. 11 Simulation of the wavy patterns of acrylic with using the inverse Fourier transform
(a) The wavy pattern obtained by the frictional experiment, (b) The wavy pattern under no consideration of the class structure, (c) The wavy pattern under consideration of the class structure

結果を示す。上から順に実験による波形、階層構造を考慮しないシミュレーション波形、階層構造を考慮したシミュレーション波形を示す。図12には、ナイロンのシミュレーション結果についても同様に示す。また、それらの波形のパワースペクトルを図13（アクリル）および図14（ナイロン）に示す。階層構

Table 2 Fractal dimensions for the simulation evaluated under considering the class structure

	Fractal Dimension (Slope β)			Frequency (cm^{-1})
	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ & Ⅳ	
Acrylic	2.000 (0.836)	1.003 (2.995)	1.941 (1.118)	13.7
Nylon	2.000 (0.396)	1.889 (1.223)	2.000 (0.090)	29.3

Fig. 12 Simulation of the wavy patterns of nylon with using the inverse Fourier transform (a) The wavy pattern obtained by the frictional experiment, (b) The wavy pattern under no consideration of the class structure, (c) The wavy pattern under consideration of the class structure

造を考慮しなかった場合は、アクリルおよびナイロンとも実験波形とは大きく異なる波形となった。一方、階層構造を考慮した場合、アクリルについては実験波形と視覚的によく似た波形を生成することができた。しかし、ナイロンについては、実験波形に似た波形は得られなかった。

図13、図14から階層構造を考慮せずに生成した波形は、そのパワースペクトルに階層構造は見られな

い。階層構造を考慮して生成させたアクリルの波形は視覚的に実験波形とよく似た波形となったが、そのパワースペクトルも図13(c)のとおり階層構造を有している。以上からも、アクリルなどの短繊維で構成され、フラクタル性を有する波形については、階層構造を考慮することにより視覚的に似た波形の生成が可能である。しかし、ナイロンについては階層構造を考慮した場合でも、視覚的にかなり異なったシミュレーション波形となった。ナイロンの実験波形の場合、特に繊維密度に対応した波長に大きなパワーを含むスペクトル分布を示したが、シミュレーションの場合、繊維密度に対応する波長に、極端に大きなパワーを有する成分は含まれていないことが最大の要因と考えられる。また、領域IVより波長の短い領域を領域IVで近似した直線の傾きで近似し、シミュレーションを行ったが、この領域では、近似直線の傾きとスペクトルの分布と大きく異なったことなども要因として考えられる。

シミュレーションでは、波形のパワースペクトル密度関数がフラクタル性を有していると仮定して行っている。つまり、短繊維試料において、視覚的に似た波形を生成できたことは、そのパワースペクトル密度関数は、明らかにフラクタル性を有するとともに、階層構造であることが確認できた。また、パワースペクトル密度関数の階層構造は、波形の特徴に大きな影響を与えることがわかった。

5. 結 言

布の摩擦係数波形に含まれる周波数分布をフラクタル次元により定量化することを提案し、摩擦係数波形のフラクタル性やフラクタル次元と波形の視覚的な複雑さなどの関係について検討した。

その結果、短繊維で構成される織物の波形と長繊

Fig. 13 The logarithm of power spectra of the wavy patterns of Fig. 11

(a) The wavy pattern obtained by the frictional experiment, (b) The wavy pattern under no consideration of the class structure, (c) The wavy pattern under consideration of the class structure

Fig. 14 The logarithm of power spectra of the wavy patterns of Fig. 12

(a) The wavy pattern obtained by the frictional experiment, (b) The wavy pattern under no consideration of the class structure, (c) The wavy pattern under consideration of the class structure

維で構成される織物の波形間では、周波数分布が異なった。そのために、短繊維の波形はフラクタル性を有すると考えられたが、長繊維の波形はフラクタル性を示さなかった。フラクタル性を有した短繊維の波形では、フラクタル次元が大きい波形の方が、波形の視覚的な複雑さの程度は大きかった。また、フラクタル次元はMMDおよび織密度とは相関関係はなかった。

以上から、MIUおよびMMDだけでは表現できない摩擦係数波形の定量的評価が可能になるとともに、風合いにおける評価値および試料の同定に役立つものと期待できる。

実験波形のフラクタル次元から、パワースペクトル密度関数の階層構造を考慮し、逆フーリエ変換を利用した波形の生成シミュレーションを行った。その結果、短繊維で構成される織物の波形については、実験結果と視覚的に良く似た波形を生成することができたことから、短繊維の波形のスペクトルは、フラクタル性を有するとともに、階層構造であることが確認できた。

参考文献

- 1) S. Kawabata; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 33, 136 (1980)
- 2) R. Akiyama, X. Hong, M. Kinoshita, F. Okamoto, K. Tanaka and T. Matsuo; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 48, T153 (1995)
- 3) S. Sukigara and T. Ishibashi; SEN-I GAKKAISHI, 50, 349 (1994)
- 4) M. Kinoshita, S. Noda, R. Akiyama and T. Matsuo; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 50, T187 (1997)
- 5) H. Takayasu; JOURNAL OF JAPANESE SOCIETY OF TRIBOLOGISTS, 40, 527 (1995)
- 6) 高安秀樹; "フラクタル", p23, 朝倉書店 (1986)
- 7) 渋谷嘉久, 川口尊久, 鏡重次郎, 畑沢鉄三; トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 317 (1995)
- 8) 内藤公喜, 藤井透; 日本機械学会論文集 (A 編) 62, 603, 194 (1996)
- 9) A. Majumdar, B. Bhushan; Journal of Tribology, 112, 205 (1990)
- 10) T. Higuchi; Physica, D, 46, 254 (1990)
- 11) 6) の文献の p152
- 12) 伊藤恵朗, 塚田忠夫; 日本設計工学会誌, 27, No. 12, 525 (1992)