研 究 報 文

動画画像処理による抄紙機上のパルプスラリーの挙動の解析

三菱製紙(株)中央研究所 小 川 進

千葉大学工学部 矢口 博久, 三宅 洋一

The Analysis of Pulp Slurry Behavior on the Papermachine Using Dynamic Image Processing Technique

Susumu Ogawa, Hirohisa Yaguchi** and Yoichi Miyake***

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Paper Mills, Ltd.

** Department of Information and Computer Science, Chiba University

Dynamic image processing was applied to analyze pulp slurry behavior on wire of a papermachine. This technique is based on processing a series of images captured with a high speed video camera system. When incident illumination was projected on the surface of slurry at grazing angle, the reflected light intensity shows a hill-valley contour. The surface of slurry can be, therefore, quantitized by this technique.

The following two contour parameters, profile size (hill-hill or valley-valley distance) and direction angle (angle of the slurry flow), are proposed to analyze the pulp slurry behavior.

By continuously taking high speed video images and comparing gray levels of each frame, the cross directional profile size and the direction angle of the pulp slurry were evaluated. The cross directional profile size was calculated by two dimensional Fourier transform, and the direction angle was calculated by co-occurrence matrices.

The experimental results indicate that there exists specific cross directional profile size and frequency of direction angle for the papermaking condition applied.

Keywords : Dynamic image processing, Pulp slurry, Orientation, Fourier transform, Co-occurrence matrix

1. 緒 言

紙の地合形成は樹種、パルプの種類、叩解の程度、抄紙条件に依存するが、特に抄紙条件（ワイヤー上のパルプスラリーの挙動）特性に大きく影響される。この抄紙条件の挙動解析は、抄造後の紙の特性から推測する静的な方法とワイヤー上のパルプスラリーの流量、濃度を実測する動的な方法により行うことができる。しかし、後者の場合、測定に時間を要すること、サンプリング時に測定場所が限定されることから、連続的に変化するパルプスラリーを厳密な意味で解析するこ

とは困難である。そこで、オンラインによるパルプスラリー挙動の解析手法を開発することが要請されている。

パルプスラリーがヘッドボックスからワイヤー上に噴出される際、スラリーを構成する繊維、填料、助剤等が水に均一に分散していると仮定するならば、ワイヤー上での水の動きを解析することにより、パルプスラリーの挙動を解析することが可能になる。

ワイヤー上のパルプスラリーに斜光を当てることによりパルプスラリー表面の形状が観察できる。そこで、ストロボを利用して、このような形状を静的な1枚の

写真として撮影し、パルプスラリーの挙動を視感的に解析することが行われてきた¹⁾²⁾。しかし、これらの定量的な解析、さらには、経時的な変動の解析はほとんどなされていない。

本研究では、パルプスラリーの表面形状が照射した斜光の反射光量変動により定量化できることを利用した。反射光量を高速ビデオカメラを用いて撮影し、得られた画像をデジタル化して画像解析処理によりパルプスラリーの表面凹凸の発生間隔と表面パターンの配向角を求めるアルゴリズムの開発を試みた。一般に凹凸の発生間隔は、時間空間上で解析が困難であることから周波数空間上で解析し、また、表面パターンの配向角は1次マルコフ過程を基にした同時生起行列を適用して算出した。

2. 実 験

2.1 スラリーの挙動を求めるためのパラメーター

抄紙機ワイヤー上において、パルプスラリーは図1に示すような表面形状を有している。ここで、このパルプスラリーの挙動を解析するためのパラメーターとして次の2つを取りあげた。

I プロファイルサイズ (Profile size)

II 配向角 (Direction angle)

プロファイルサイズは、表面形状の山と谷の間隔として定義する。この形状は三角関数の合成波に近似でき、スペクトル解析を用いて周波数空間上で求めることができる。プロファイルサイズはパルプスラリーの局所的な質量変動の幅を示すことから、抄造後のフロックサイズに代表されるような紙の地合に密接に関係すると考えられる。

Fig. 1 Schematic view of pulp slurry on wire.

一方、配向角は表面形状の山部または谷部の方向として定義し、90°をMD方向とした。この配向角は抄造後の繊維の配向性、すなわち紙の引裂き、引張り強度、剛性等紙の物性に影響する紙の配向性に何らかの形で関係すると考えられる。

2.2 パルプスラリーの可視化

パルプスラリーの表面形状を強調するために、表面に斜光(法線から45度)を照射し、反射光からその形状を求めた。法線となす角度 θ で入射した光は表面で反射し、鏡面反射光と拡散反射光に分離される。鏡面反射光強度 I は、表面粗さ R との間に次式で示す関係を有する³⁾。

$$I = I_0 \exp \left(- \frac{4\pi R \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

I : 反射光強度

I_0 : 入射光強度

R : 表面粗さのRMS (Root Mean Square)

θ : 入射角

λ : 光線の波長

すなわち、一定の照明下で反射してくる光の強度は、パルプスラリーの表面粗さ、すなわち表面形状を表わすと考えて良い。

2.3 解析システム

本研究では、ワイヤー上に生成するパルプスラリーの表面形状を画像としてとらえ、その画像からパルプスラリーの挙動解析を試みた。経時的な挙動をとらえるために、入力には高速ビデオカメラ(1フレームを1/1,000 secで撮影)を利用して画像の取り込みを行った。

撮影場所には、抄速280 m/minの長網抄紙機のヘッドボックス部を選択し、そこからワイヤー上に噴出したスラリーを撮影した。表1に本研究で用いた撮影条件を示す。ここで、シャッター速度(サンプリング間隔)が重要であると考えられたので3水準に変化させた。また、撮影における照度むらの発生を防ぐために、記録される画像部分の四隅の照度を合わせるライティング調整を行い、結果として 957 ± 12 [lx]の条件で撮影を行った。図2には本研究で使用したシステムの構成を示す。

高速度ビデオカメラはEktapro 1000 Imager(コダック社製)、デコーダーにNexus N 68390 D(柏木研究所社製)、イメージプロセッサにNexus 6510(柏木研究所社製)を使用し、Sun 3/160(Sun micro systems)で処理を行った。この高速ビデオカメラの場合、毎秒10⁸画素で画像を撮影することから、本研究で

Table 1 Experimental conditions

Conditions for videographing	
Paper machine	Fourdrinier type machine speed 280 m/min.
Position	After headbox
Video system	Ekta pro Imager 1000 by KODAK corp.
Shutter speed	1/250, 1/500, 1/1,000 sec.
Digitization of video images	
Sampling	256×256 pixels, equals to 235.8×235.8 mm.
Quantization	8 bits (256 gray levels)
Video images as NTSC signal were digitized to RGB signal by NEXUS N 68390 D decoder and NEXUS 6510 image processor.

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic image analyzing system.

テストした抄速 280 m/min には、単位画素当りの画像のふれは約 5×10^{-5} mm となり、単位画素当り撮影長 (0.92 mm) と比較してかなり小さいことから無視することができる。

2.4 画像のサンプリング

本研究で使用了高速度ビデオカメラはモノクロ CCD カメラであることから、撮影された画像を NTSC 方式の輝度信号に変換し、この輝度信号を 8 ビットの A/D 変換によって量子化した。

パルプスラリーの挙動を定量化するためには、ここで得られた階調と表面粗さが線形であると仮定する必要がある。可視化された挙動は反射光強度 I であるから、一定の照射 (入射) 光強度 I_0 から反射濃度 D に置換することができる。式(1)を反射濃度で置換すると、反射濃度と表面粗さとの間には、定数 k を用いた以下の関係が存在する。

Fig. 3 Characteristic curve of high speed video camera system.

$$\begin{aligned}
 D &= -\log_{10} \frac{I}{I_0} \\
 &= \frac{1}{2.303} \left(\frac{4\pi R \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \\
 &= kR^2 \quad \dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

反射濃度 0.1 から 1.4 のグレーチャートを実験で使用了システムで撮影し、グレーレベル (階調) に変換した結果を図 3 に示す。ここから反射濃度とイメージプロセッサのグレーレベルとの間には、1 次の線形性が成立していることがわかる。すなわち、反射光強度から求められるパルプスラリーの表面粗さはグレーレベルを用いて定量的に表わすことが可能である。

標本化数は 256×256 [pixel] とし、256 フレームについてデジタル化処理を行った。

2.5 プロファイルサイズの算出

表面形状を表わす画像は、ビデオ画像のためにフレーム数が多くなると解析データ量が膨大になることから、画像の圧縮を行いプロファイルサイズを算出し

Fig. 4 Method of making a compressed image from a series of frames.

た。

画像の圧縮は以下の通りに行った。

すなわち、各フレーム中で抄紙機 CD 方向を x 、MD 方向を y とすれば、固定位置で画像を撮影しているから各フレーム中の画素の位置は不変である。したがって、ある MD 方向の位置 y_i に配列する CD 方向の画素 $x_0 \sim x_{n-1}$ を各フレームから抽出し、時系列に連結したものは、その MD 方向における表面形状の経時変化を示す画像となる(図4)。この方法による画像データの圧縮によって、同一の MD 方向位置における CD 方向の表面形状の変化は、3次元の画像から得られる結果と同様となる。これに対して、MD 方向はフレーム間隔(シャッター速度)で決定されるサンプリング周波数が、サンプリング定理^{4),5)}を満足するものであるなら、CD 方向においても同様の考え方ができる。しかし、本研究では MD 方向は考慮せず、CD 方向のみの解析を行った。

本研究で定義した表面形状のプロファイルサイズの算出は表面が複雑な形状であるから、時間空間上での解析は不可能である。しかし、どのような複雑な表面形状を有していても、その形状は任意の関数として考えることができるから、フーリエ級数を展開することによってその関数を構成する三角関数を求めることができ、逆にそれらの三角関数を合成することによって表面形状を完全に再現できる^{4),5)}。したがって、表面形状のプロファイルサイズの算出は表面形状を構成する三角関数の周波数を求めることによって周波数空間上で可能となる。この周波数を求めるために、先に述べた圧縮画像に対して2次元のフーリエ変換を行った。変換するデータはデジタル画像 $f(x, y)$ であること

から、離散的フーリエ変換となり次式で定義される⁶⁾。

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) W_x^u W_y^v \quad \cdots(3)$$

$$W_x = \exp\left(-i \frac{2\pi}{M}\right), \quad W_y = \exp\left(-i \frac{2\pi}{N}\right)$$

ここで、

$F(u, v)$: 周波数空間上での画像

$f(x, y)$: 時間空間上での画像

M, N : 画像データサイズ

$i : i^2 = -1$

u, v, x, y : それぞれの空間での画像位置

また、

$$\Delta u = \frac{1}{M\Delta x}, \quad \Delta v = \frac{1}{N\Delta y}$$

さらに離散的フーリエ変換の場合、有限区間の積分となることから、これによって発生する問題を軽減するために、変換前にハニング窓関数を適用した。また、実際の計算には Sande-Turkey のアルゴリズムに基づく高速フーリエ変換を用いた。

プロファイルサイズは式(3)から得られる実数項 F_r と虚数項 F_i を用いたパワースペクトル F_p の強度から求めた。

$$F_p^2(u, v) = F_r^2(u, v) + F_i^2(u, v) \quad \cdots(4)$$

2.6 配向角の算出

表面形状を示す画像から表面の凹凸を配向角を求めるためには、1次マルコフ過程を基にした同時生起行列を適用した。ただし、この場合の解析には、1フレーム毎の画像を使用した。パルプスラリーがある方向性を有しているとすれば、その方向に存在する画素は同一または比較的近い値の濃度(グレーレベル)であると考えられる。逆に方向性が存在しない場合には、その画素間の濃度対はランダムな確率で存在すると考えられる。したがって、この画素間の濃度対の生起頻度を画像中のすべての濃度対について調べる同時生起行列により方向性の検出が可能である。

本研究において、同時生起行列としては中心画素からの距離として5画素離れた相対角度 $45 \sim 135^\circ$ 間に存在する9方向の画素との濃度対から求めた。更にその距離をできる限り等しいものにするために、相対位置として図5に示した画素をその対象画素とした。

同時生起行列を特徴づけるために、Haralick ら⁶⁾が提唱した指標のうち、本研究では次式で定義される「コントラスト : CON(d, θ)」を適用した。

$$\text{CON}(d, \theta) = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (i-j)^2 p(i, j; d, \theta) \quad \cdots(5)$$

Fig. 5 Relative positions to calculate 9 directional cooccurrence matrices.

ここで、

$p(i, j; d, \theta)$: 同時生起行列から求められる結合確率 d, θ は、相対位置を示す。

g : グレーレベル。

コントラストは、画像中に方向性が存在する場合にその方向での値を最低にする特徴を有する。したがって、9方向についてのコントラストが最低になる方向にパルプスラリーは配向している事になる。この配向角 θ_0 の算出には次式を用いた。

$$\theta_0 = \frac{\sum_t \{ \text{CON}_{\max} - \text{CON}(d, t) \} t}{\sum_t \text{CON}_{\max} - \text{CON}(d, t)} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

$\text{CON}_{\max}$: $\text{CON}(d, t)$ の最大値

d, t : 画素の相対位置を示す変数

配向角を求める操作を1フレーム単位ですべての画

素に対して行い、経時的な配向角の変化を求めた。

なお、相対的な画素位置を設定する際に、画素間距離を5画素としたが、これは1) 方向性が存在する場合には、5画素程度の連続した濃度を有するであろうと仮定したこと、2) 式(6)による算出を行う場合には、できる限り多くの相対角度を適用した方が精度が上がるためである。

このアルゴリズムによって算出された配向角は、画像中に複数の異なった配向角を有する表面形状が存在する場合にはそれらの平均値となる。したがって、本来はそれら個々の配向角を算出する必要があると考えられるが、このアルゴリズムを適用して画像をローカルに処理することで回避できると考えられる。このため、本研究では平均値としての配向角を用いた。また、周波数空間での解析も考えられたが、計算時間が膨大になること、表面形状が複雑になるほど定量的な情報を抽出することが困難になるため、配向角の算出には用いなかった。

3. 結果及び考察

3.1 プロファイルサイズ

撮影したビデオ画像から得られた圧縮画像を写真1に示す。x方向がCD方向(235.8 mm)を、y方向はMD方向を示す。MD方向の長さはシャッター速度によって異なり、1/250 secで4,779 mm、1/500 secで2,389 mm、1/1,000 secで1,195 mmとなる。これらの圧縮画像から、パルプスラリーはCD方向にある周期のプロファイルサイズをもち、蛇行しながら流れていることが観察された。

また、写真2には各圧縮画像をフーリエ変換し、それらのパワースペクトルを光学的回折像の形で示す。

Photo. 1 Compressed image from videography images.

(a): shutter speed 1/250 [sec], (b): 1/500 [sec], (c): 1/1,000 [sec].

Photo. 2 Two dimensional Fourier Power spectrum of Photo 1.

(a) ; shutter speed 1/250 [sec], (b) : 1/500 [sec], (c) : 1/1,000 [sec].

Fig. 6 a Cross directional power spectrum at shutter speed 1/250 [sec].

Fig. 6 c Cross directional power spectrum at shutter speed 1/1,000 [sec].

Fig. 6 b Cross directional power spectrum at shutter speed 1/500 [sec].

シャッター速度に関係なく、CD 方向のほぼ同一の位置に比較的低周波の MD 方向に伸びる帯状のスペクトル群が認められる。シャッター速度を早くすると

MD 方向への帯状の長さが短くなることから、MD 方向の挙動も反映していることが観察される。ここで、CD 方向についてのプロファイルサイズを算出するために、MD 方向の直流成分軸上に分布する CD 方向のパワースペクトルを図 6 に示す。CD 方向のプロファイルは、比較的大きな凹凸の発生間隔で構成されていることが認められ、この抄紙機の場合、32 mm, 60 mm 付近に固有のピークの存在がある。このサイズは抄紙機特性、抄造条件に起因したものと考えられるが、その関係する因子を抽出することはできなかった。

CD 方向のプロファイルサイズの算出のみを考えるならば、あえて 2 次元のフーリエ変換を適用する必要はない。ある一定の MD 方向位置で撮影した CD 方向の画素を 1 次元フーリエ変換し、それを時間で積算することも可能と考えられる。図 7 にはこのようにして求めた積算パワースペクトルを示す。図 6 で認められた固有のスペクトルピークと同一位置にピークが存在

Fig. 7 Integrated cross directional power spectrum at shutter speed 1/1,000 [sec].

する。このことから、CD 方向に対するプロファイルサイズの算出には、CD 方向のみに 1 次元に配列したライン CCD でとらえた信号からの高速度の解析も可能なことが示唆された。その方法によれば MD 方向のサンプリング数が無限に設定できる利点を有すると思われる。

3.2 配 向 角

圧縮画像から、パルプスラリーは蛇行しながら移動していることが観察された。しかし、圧縮画像からでは、経時的な配向角の変化を定量的に求めることはできない。スラリーがそのベクトルをどの方向に向けていてもその変化が定常的であれば、圧縮画像上の表面形状は常に MD 方向に 90° を向くからである。したがって、この場合は 1 フレーム単位で配向角を求める必要がある。

図 8 には同時生起行列から得られた配向角の経時的な変化を示す。この結果から、撮影した位置でのパルプスラリーは、約 $2\sim 3^\circ$ 前後ずれた配向角で抄造され

Fig. 8 a Variation in direction angle at shutter speed 1/250 [sec].

Fig. 8 b Variation in direction angle at shutter speed 1/500 [sec].

Fig. 8 c Variation in direction angle at shutter speed 1/1,000 [sec].

Fig. 9 a Wiener spectrum of Fig. 8 a.

ていることが判る。また、配向角の経時的な変化には周期性が見られ、図 9 のウィナースペクトルから、その周期は約 9 Hz であることが判る。この周期は実験した抄紙機のシェーキの稼動周期に一致する。シャッター速度を下げた場合には、さらに低周期の経時変化を観察することができた。

Fig. 9 b Wiener spectrum of Fig. 8 b.

Fig. 9 c Wiener spectrum of Fig. 8 c.

4. 結 言

画像データを基にしたワイヤー上のパルプスラリーの挙動解析から、CD 方向のスラリー表面形状の定量化と経時的な凹凸の配向角の算出が可能になった。今

後の問題として、表面形状の解析によって地合の形成過程が判るのか、スラリー中の繊維の分布が均一でない場合の考慮はできるのか等が残されている。また、解析をグレーレベルで行うために、CCD に入力する光量が増加した場合には結果が異なるなど方法上での問題も残されている。オンラインでの計測を検討する場合には、表面形状を高さとしての物理量に置き換えた解析を考える必要がある。

参考文献

- 1) L. Diane Murdock, "Wet end analysis using high speed 35 mm photography", Tappi proceeding; Papermakers conference, pp.95-102 (1985).
- 2) A. Bames, "High-speed photography, A diagnostic tool on the wetend of high speed newsprint machine", Appita, Vol.42, No.5, pp.332-334, April (1988).
- 3) Depew, C. A. and R. D. Weir, "Surface Roughness Measurement by Reflectance", Appl. Opt. 10, pp.969-970 (1971).
- 4) 日野幹雄, "スペクトル解析", 朝倉書店 (1977).
- 5) D. C. Champeney, "Fourier Transform and Physical Applications", Academic Press (1973).
- 6) R. C. Gonzalez, P. Winz, "Digital Image processing", Addison-Wesley Publishing Company (1987).

(受理: '91.3.15)