研究報文

コンピュータ画像処理によるパルプシートの構造解析 (第4報) 可視光による地合むらと視覚特性

京都大学農学部 湯原 隆*, 蓮池 牧雄, 村上 浩二

Application of the Image Processing Technique for Analysis on Sheet Structure of Paper IV. Comparison with Visual Evaluation of Formation

Takashi Yuhara, Makio Hasuike and Koji Murakami

Faculty of Agriculture, Kyoto University

The relationship between the visual evaluation of formation and the textural features of light transmitted images of sample sheets is discussed using 5 kinds of newsprint papers.

The two rank correlation coefficients associated with the relationship between the visual evaluation of floc and the textural feature f_e from the co-occurrence matrices were determined to be 1.0 (The matrices were calculated with images which were digitized with 1600 μ m and 3200 μ m detection spots).

The four rank correlation coefficients associated with the relationship between the visual evaluation of wire mark and the textural features f_l and f_l' from the wavelength spectrum were determined to be 0.90 (The value of f_l was extracted from the wavelength range 200~3000 μ m, and the values of f_l' were extracted from the wavelength ranges 200~2000 μ m, 200~3000 μ m, 200~4000 μ m).

Thus, there is strong evidence that these two image analysis technique (i.e. the co-occurrence matrix and the wavelength spectra) may be correlated with the visual evaluation of floc and wire mark, respectively.

Keywords: Formation, Newsprint paper, Visual evaluation, Textural feature, Co-occurrence matrix, Wavelength spectra

1. 緒 言

紙は数多くの繊維が分散、重畳して形成された紙層より成り、また繊維の分散状態に由来する不均一性を有している。そのうち、特にシート面内での不均一性の視覚的側面は地合と呼ばれ、紙の重要な品質の一つとなっている。しかし、地合は本来人間の感覚によって評価される性質であるため、その定義は曖昧である。すなわち、地合は紙の様々な構造的、物理的性質の複合により定まる特性ではあるが、その評価は最終的に

は人間の感覚的、心理的尺度に依存していると考えることができる。

さて、地合むらを紙の物理的性質の測定により客観的に評価しようという試みは古くから行われており、現在では専用の計測機器も市販されている¹⁾。計測には通常、可視光や放射線の透過強度が用いられ、得られた1次元の変動を周波数解析する手法が一般的である²⁾³⁾。しかし、透過強度の変動の差異は複雑かつ微妙であるため、これらの機器による評価が必ずしも十分でない場合があることはよく経験される。このため

* 現在の所属：王子製紙株式会社中央研究所, Central Research Laboratories, Oji Paper Co., Ltd.

近年, 新しい地合評価法として, 透過強度の2次元の分布を表すデジタル画像から地合むらに関する特徴量を抽出する手法が検討されている。例えば, BerghとLuner⁴⁾は可視透過像を用い, 透過光強度の変動を変動係数(標準偏差を平均で除した値)により評価している。また, Goress⁵⁾は板紙の密着写真を画像化し自己相関関数から導いた特徴量で紙中の繊維ブロックについての評価を行った。さらに, JordanとNguyen⁶⁾はベータ線ラジオグラムの画像を用い, 平均坪量以上の部分の周囲長を特徴量として地合むらの評価を行っている。また, 筆者ら⁷⁾⁸⁾はX軟線ラジオグラムから得た紙の質量分布画像について同時生起行列(結合確率密度分布)を算出し, 質量変動に関する特徴量を抽出する方法を提案している。以上の画像解析を用いた方法は, その高速性, 解析手法選択の自由度などの点で地合評価法の検討に有利であり, さらに地合むらをテクスチャーとして捉えればテクスチャー解析の手法が適用できるため, 従来とは異なる視点からの解析も可能になると考えられる。

さて, 先にも述べたように地合むらが複数の物理的性質の複合により発現すると考えるならば, その評価も複数の評価値により総合的ななされるべきであろう。事実, 波長スペクトルや同時生起行列は1次元あるいは2次元の広がりを持つ値の集合であり, それ全体で地合むらの特性を表現している。しかし, 実際に地合むらの比較, 評価を行う場合には, 明確な順位や優劣を決定しなければならないことが多く, この意味においては上述の画像解析による各手法のように, 評価を1つの特徴量で表現することが必要となる。すなわち, 地合評価法の検討を行う際には, 評価の目的と対象を限定したうえで, 従来からの手法も含めた総合的な検討を行い, 的確な評価の可能な特徴量を選択することが不可欠であると考えられる。

そこで本報では, 紙の地合むらの視覚的側面のみに注目し, 新聞用紙の可視光透過像について検討を行った。すなわち, デジタル化した透過像について前報までに示した手法を用いて同時生起行列を求め, さらに従来から広く応用されている波長スペクトルの算出も行った。そして, これらから得られる特徴量と試料シートの地合むらの官能検査結果を比較し, その対応関係を検討した。

2. 実 験

2.1 試 料

坪量および光学的性質が類似し, かつ地合むらとワイヤーマークの明瞭さの程度の異なる新聞用紙5種類

を選んで試料としたが, その概要を後述の官能検査の結果と共に表1に示す。

2.2 可視光透過画像の作成

可視光透過画像は試料シートの密着写真をデジタル画像化することにより作成した。密着写真は, 試料シート(10×10cm)とグレイレベル値校正用の光学濃度ステップウェッジを撮影フィルム上に密着させて写真用引き伸ばし機の露光台上に置き, あらかじめ試料面に焦点を合わせた可視光を露光して撮影した。撮影フィルムにはフジソフテックスFG, 現像液には処方D-23の1/2濃度溶液を用いたが, この組み合わせにより密着写真中の全ての部分の光学濃度をフィルム特性曲線の直線部分に入れることが可能となった。密着写真は画像入力装置ドラムスキャナ(オプトロニクス社製カラスキャンC-4100)を用いてデジタル画像(検出スポット径50 μ m)として収録し, 磁気テープを介して大型計算機(FACOM M-382, 京大大型計算機センター)に転送した。

さて, 得られた画像は撮影時に生じた周辺減光などのシェーディングを含むが, 本実験では低周波フィルター(波長21.5cm以上の長波成分を除去)を用いてこれを補正した。次に, 画像中の光学濃度ステップウェッジよりグレイレベル値の校正曲線を求め, 試料部分のグレイレベル値を光学濃度に換算した。なお, フィルム特性曲線の直線領域では, ステップウェッジの光学濃度とその部分のグレイレベル値は直線関係を有する。

なお, 本研究でシートの密着写真を用いた理由は以下のとおりである。すなわち, 人が紙を透かして見る場合に知覚される像には, シート中の対応する地点を透過した光の他にその周辺で散乱した光の影響が含まれるが, シートの密着写真を用いることによりこの影響をも考慮した画像を得ることができるからである。

2.3 同時生起行列および波長スペクトルの算出

2.3.1 同時生起行列

同時生起行列はテクスチャーの特性を表現する手法の一つであり, ある一定の位置関係にある2つの画素値の組み合わせすべてについて, その存在確率の分布を行列の形式で表したものである⁹⁾¹⁰⁾。

本研究では, 同時生起行列の算出に先立ち, 画像の圧縮および各画素の光学濃度値の再量子化を行った。画像の圧縮は, 各画素の光学濃度値を透過率に換算し, 2×2画素群の平均値を求め, その値を再び光学濃度に直すことにより行った。この操作を繰り返すことにより, 7種のスポットサイズ(100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 μ m)に相当する圧縮画像を得た。

なお、ここで最小スポットサイズを $100\mu\text{m}$ としたのは、人間の目の空間周波特性を考慮した結果である¹¹⁾。また、最小スポットサイズにおいても圧縮操作を行ったのは、撮影フィルムの粒状性などにより生じる雑音の影響を除くためである。各画素の光学濃度値の再量子化は、各試料シートについてその平均値から ± 0.4 Dの範囲を10階調に分割し、各階調に1から10までの整数値を与えることにより行った。ここで10階調を用いたのは、演算時間を短縮するとともに、簡易画像入力装置およびマイクロプロセッサの使用を想定したことによるものである。

同時生起行列の算出は、得られた画像（各試料あたり7種）の各々について、マシン方向およびクロスマシン方向に隣接する2画素の組み合わせを行い、両方向の結果を平均して以下の解析に供した。

同時生起行列からの特微量としては、前報⁷⁾で示した特微量のうち、 f_b 、 f_c 、 f_e を用いた。各特微量の定義式を以下に示す。

$$f_b = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j) \log P(i, j) \quad (1)$$

$$f_c = \sum_{k_1} k_1 \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j) \right\} \quad (2)$$

$$k_1 = |N - i - j + 1|$$

$$f_e = \sum_{k_2} k_2 \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j) \right\} \quad (3)$$

$$k_2 = |i - j|$$

なお、 $P(i, j)$ は同時生起行列、 N は量子化された光学濃度の階調数（ここでは10）である。各特微量とも一般にテクスチャーの不均一性が高いほど大きな値をとり、 f_e は行列内での要素値の全体的な分散の程度、 f_b は行列内での対角軸方向の分散の程度、 f_c は対角軸と直角方向の分散の程度を表す。

2.3.2 波長スペクトル

波長スペクトルとはパワースペクトルの周波数表示を波長表示に変換したものであり、入力変動を各波長ごとの振幅の自乗平均値（パワー）の分布で特徴づける手法である。本実験では、マシンおよびクロスマシン方向からそれぞれランダムに100ラインを選択して1次元の波長スペクトルを計算し、これらを平均する方法を用いた。ここで2次元スペクトルを算出しなかった理由は、本研究では地合テクスチャーの規則性や異方性が解析の対象とはならないこと、計算が容易であることによるものである。

計算に際しては、まず各画素の光学濃度値を試料全体の平均値で除してから、画素数2の長さの平滑化フィルター（撮影フィルムの粒状性などにより生じる雑

音の影響を除く）とハニングフィルター¹²⁾（入力変動の両端値の差により生じる雑音の影響を除く）を施し、次いで高速フーリエ変換を用いてパワースペクトルを求め、その結果を波長スペクトルに変換する手順をとった。

波長スペクトルからの特微量としては、スペクトル曲線における長波長部とピーク部の面積（自乗平均値の和）に関するものを用いた。長波長部の面積に関する特微量としては、波長領域0.4-6.4 μm の5つの波長帯（0.4-0.8, 0.8-1.6, 1.6-3.2, 3.2-6.4, 6.4-12.8 μm ）に分け、それぞれの波長帯におけるスペクトル曲線の作る面積（以下特微量 f_h と呼ぶ）、およびそれをスペクトル曲線全体が作る面積で割った値（以下特微量 $f_{h'}$ と呼ぶ）を求めた。また、ピーク部の面積に関する特微量としては、スペクトル曲線にメジアンフィルターを施してベースラインを設定し、それより上の部分をピークとみなしてその面積を算出した。すなわち、波長 $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.4 \mu\text{m}$ の4つの波長帯（ ~ 0.1 , ~ 0.2 , ~ 0.3 , $\sim 0.4 \mu\text{m}$ ）の面積（以下特微量 f_i と呼ぶ）、およびそれをスペクトル曲線全体が作る面積で割った値（以下特微量 $f_{i'}$ と呼ぶ）を求めた。

2.4 官能検査

新聞用紙を扱い慣れている13名のパネリストに依頼して行った。試料シートを乳白色板上に置き、白色散乱光によるいわゆる透し地合を、ブロック、ワイヤーマーク、トータルの項目について順位法により評価した。各項目とも不明瞭なものから明瞭なものへ順に順位を与えた。なお、検査項目トータルについては、評価の尺度が、他の2つより曖昧であると考えられるため、ここでは検討の対象から除外した。

3. 結果および考察

3.1 可視光透過画像およびその同時生起行列と

波長スペクトル

試料シートの密着写真より作成した可視光透過画像を図1に示す。なお、試料シートには官能検査結果における検査項目ブロックの順位（表1）に従い、A-Eの記号を付けた。

図2はスポットサイズ1600 μm の画像から求めた同時生起行列を結合確率密度分布図で示したものである。各画像の有する地合テクスチャーの特性は等高線の形状、すなわち行列内の要素値の分布状態の違いに現れている。ただし、ワイヤーマークなどの微細なテクスチャーの特徴は小さなスポットサイズの画像から得られた行列に、またブロックなどの大きなテクスチャーの特徴は大きなスポットサイズの画像から得られた

Fig. 1 Representation of optical density distribution for sample sheet (photographs of image display).

Fig. 2 Contour maps of joint probability density distribution, obtained from co-occurrence matrices of optical density.

Fig. 3 Wavelength spectra of optical density distribution of sample sheets.

Fig. 4 Textural features obtained from co-occurrence matrices.

行列に現れると考えられる。

図3は各画像から求めた波長スペクトルである。各画像の地合テクスチャーの特性は、スペクトル曲線の全体的な高低、および短波長部分にみられる鋭いピークに現れている。すなわち、スペクトル曲線における長波長部の高低は繊維ブロックの多少に、また短波長部の鋭いピークはワイヤーマークの明瞭さに関連する。

3.2 同時生起行列からの特徴量

図4には、各試料シートの同時生起行列から得た特徴量のスポットサイズ依存性を示す。ここで、特徴量 f_b はテクスチャーの包括的な不均一性、 f_c は大きなうねりの程度、 f_e はきめが細かく振幅の大きい変動の程度を表す。

スポットサイズによる各特徴量の変化の傾向は試料シートにより若干異なっており、また試料シート間での順位もスポットサイズにより変動している。これは異なるスケールのテクスチャーが混在していることに起因しており、先にも述べたように小さなスポットサイズではワイヤーマークの明瞭さの程度、大きなスポットサイズでは繊維ブロックの多少の程度を表していると考えられる。

官能検査の結果を表1に、またそれと各特徴量との対応関係を順位相関係数として表2および表3に示す。スポットサイズ800, 1600, 3200, 6400 μm の画像より得られた各特徴量は検査項目ブロックと良好な相関がみられる一方、スポットサイズ100, 200, 400 μm の

画像より得られた各特徴量は検査項目ワイヤーマークと比較的良好な相関が認められた。ただし、特徴量 f_c と検査項目ブロックについてはスポットサイズ3200 μm と6400 μm では相関係数が著しく小さく、また検査項目ワイヤーマークについても相関係数が低かった。これは特徴量 f_c が行列内対角軸方向の要素値の分布、すなわち画像内で類似した画素値が隣接する程度を表現しているためと考えられる。また、いずれの特徴量についても検査項目ワイヤーマークはブロックほど相関係数が高くない。これは同時生起行列による評価が隣接2画素の関係にのみ注目する手法であり、スポットサイズとテクスチャーの規則性（ここではワイヤーマークの間隔）が得られる行列に影響するためと考えられる。

3.3 波長スペクトルからの特徴量

図5には各試料シートの波長スペクトルから得た特徴量を示す。ここで、特徴量 f_h, f_h' は繊維ブロックの存在の程度を、また特徴量 f_i, f_i' はワイヤーマークの明瞭さの程度を表すと考えられる。

さて、特徴量 f_h と f_h' を比較すると、同一波長帯における試料シート間の大小関係が逆転する場合が認められる。これは特徴量 f_h が自乗平均値そのものであるのに対し、 f_h' は各シートでの総和に対する割合であることによるものである。特徴量 f_i と f_i' はワイヤーマークに相当する波長の自乗平均値から雑音のそれを差し引いた値と考えることができるが、この場合は

Table 1 Physical Properties and rank of visual evaluation.

Property Sample	Basis weight (g/m ²)	Scattering coefficient (m ² /g)	Absorption coefficient (m ² /g)	Wire		Rank of visual evaluation	
				Top	Bottom	Floc	Wire mark
A	45.9	550	98.2	S	S	1	5
B	49.0	486	86.2	S	D	2	4
C	47.2	541	96.4	D	D	3	2
D	47.3	557	79.7	S	D	4	1
E	47.1	561	87.8	S	D	5	3

Note: S: single twill wire, D: double twill wire.

Table 2 Rank correlation coefficients between textural features from co-occurrence matrices and visual evaluation of floc.

Textural feature	Spot size of digital image (μm)			
	800	1600	3200	6400
f_b	0.90	0.90	0.90	0.70
f_c	0.90	0.90	0.40	0.10
f_e	0.70	1.00	1.00	0.90

Table 3 Rank correlation coefficients between textural features from co-occurrence matrices and visual evaluation of wire mark.

Textural feature	Spot size of digital image (μm)		
	100	200	400
f_b	0.80	0.30	0.10
f_c	0.30	0.30	-0.30
f_e	0.80	0.70	0.70

Fig. 5 Textural features obtained from wavelength spectra.

Table 4 Rank correlation coefficients between textural features from wavelength spectra and sensory evaluation of floc.

Textural feature	Wavelength range (cm)				
	0.4~6.4	0.4~0.8	0.8~1.6	1.6~3.2	3.2~6.4
f_h	0.40	0.10	0.70	0.40	0.50
f_h'	0.80	0.0	0.87	0.50	0.60

Table 5 Rank correlation coefficients between textural features from wavelength spectra and visual evaluation of wire mark.

Textural feature	Wavelength range (cm)			
	$0.2 \times 10^{-1} \sim 0.1$	$0.2 \times 10^{-1} \sim 0.2$	$0.2 \times 10^{-1} \sim 0.3$	$0.2 \times 10^{-1} \sim 0.4$
f_i	0.70	0.70	0.90	0.70
f_i'	0.60	0.90	0.90	0.90

試料シート間の大小関係にそれほどの差は認められなかった。

表4には繊維ブロックについての特徴量 f_h , f_h' と官能検査項目ブロックの順位相関係数を示した。波長 0.4~6.4cm および 0.8~1.6cm における特徴量 f_h' が比階的良好な相関を示したが、同時生起行列からの特徴量より相関係数の値は小さい。表5にはワイヤーマークについての特徴量 f_i , f_i' と官能検査項目ワイヤーマークの順位相関係数を示した。波長 $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.3$ cm における f_i および波長 $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.2$, $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.3$, $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.4$ cm における f_i' の相関係数が高いが、これは同時生起行列からの特徴量の場合より高い値である。

4. 結 論

5種類の新聞用紙を試して、まず密着写真より可視光透過画像を作成し、同時生起行列および波長スペクトルを算出した。次いで、これらより抽出した特徴量と試料シートの地合むらに関する官能検査結果について順位相関係数を用いて、比較、検討を行った。その結果、官能検査項目ブロックは同時生起行列からの特徴量 f_e (ただしスポットサイズ 1600, 3200 μ m) と、また官能検査項目ワイヤーマークは波長スペクトルからの特徴量 f_i (波長 $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.3$ cm) および特徴量 f_i' (波長 $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.2$, $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.3$, $0.2 \times 10^{-1} \sim 0.4$ cm) と最も高い相関を示した。このことから、地合むらの視覚特性のうち、ブロックの評価には同時生起行列、またワイヤーマークの評価には波長スペクトルの適用の有効性が示唆された。これは同時生起行列が統計的性質によりテクスチャーを記述する手法であるのに対し、波長スペクトルはテクスチャーの構造的性質に着目した手法であることに由来すると考えられる。すなわち、ブロックのように規則性のほとんどないテクスチャーの評価には同時生起行列が、ワイヤーマークのように規則性の高いテクスチャーの評価には波長スペクトルが適していると考えられる。

なお、本研究で用いた特徴量は必ずしも画像の視覚特性を記述するために作られたものではないが、得られた結果は今後の新しい地合評価法開発に向けての基礎的な知見となり得ると考えられる。しかし、本研究で行った実験では試料シートの種類と数が限られているため、汎用性の高い手法を開発するためにはさらに多くのデータを集積することも必要であろう。また、紙の持つ物理的な性質だけではなく、地合むらの視覚

特性そのものについて、視覚系の心理物理学 (psychophysics) を考慮に入れた検討が必要になると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、試料の新聞用紙ならびにその官能評価結果を御提供いただいた王子製紙(株)中央研究所に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 例えば、土田幸造, 竹内伸夫, 大谷耕作, 計装, 23, 1 (1980)
- 2) B. Norman and D. Wahren, "THE FUNDAMENTAL PROPERTIES OF PAPER RELATED TO ITS USE" ed. by F. Bolam, Technical Division of British Paper and Board Industry Federation, London, p7 (1973)
- 3) 土田幸造, 半田美次, 門屋 卓, 村田正男, 紙パ技協誌, 21, 43 (1967)
- 4) P. Bergh and P. Luner, "THE ROLE OF FUNDAMENTAL RESEARCH IN PAPER MAKING" ed. by J. Brander, Mechanical Engineering Publication Limited, London, p707 (1983)
- 5) J. Gorees, "PAPER MAKING MATERIALS" ed. by V. Punton, Mechanical Engineering Publication Limited, London, p363 (1985)
- 6) B. D. Jordan and N. G. Nguyen, Paperi ja Puu, 68, 476 (1986)
- 7) 湯原 隆, 蓮池牧雄, 村上浩二, 織学誌, 42, T-279 (1986)
- 8) 湯原 隆, 蓮池牧雄, 村上浩二, 紙パ技協誌, 40, 949 (1986)
- 9) R. M. Haralic and K. Shanumgan, IEEE Trans. Geosci. Electron., GE-11, 171 (1973)
- 10) R. M. Haralic, K. Shanumgan and I. Dinstein, IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics, SMC-3, 610 (1973)
- 11) 池田光男, 「視覚の心理物理学」, 森北出版, p146 (1977)
- 12) 日野幹雄, 「スペクトル解析」, 朝倉書店, p167 (1977)

(受理: 62. 2. 18)