研 究 報 文

エレクトログラフ法による紙試料の質量分布測定（第2報）

4種類の画像作製法の比較：

 β 線ラジオグラフィ法，エレクトログラフ法，光透過法，
および軟X線ラジオグラフィ法三菱製紙(株)中央研究所 富 増 弘
ニューヨーク州立大学 環境科学および森林学部 フィリップ・ルナーImaging of Mass Distribution in Paper by Electrography
Technique (2)Comparison of Four Paper Imaging Techniques :
 β -Radiography, Electrography, Light Transmission,
and Soft x-Radiography

Hiroshi Tomimasu

Mitsubishi Paper Mills, Ltd., Central Research Laboratory

Philip Luner

State University of New York, College of Environmental Science and Forestry

Four paper imaging techniques (β -radiography, electrography, light transmission, and soft x-radiography) were compared in terms of their process parameters and image characteristics (exposure time, spatial variation, contrast, spatial resolution, correlation with mass, and limitation in basis weight range) with the same newsprint sample and electron microscope film. As far as the imaging conditions chosen here are concerned, electrography gave a higher spatial resolution, shorter exposure time, and the wider basis weight range than β -radiography. Light transmission image could be obtained in a very short time, but gave the poorest spatial resolution and correlation with mass. Soft x-radiography gave the highest spatial resolution, but the poorest spatial variation and contrast. The proper imaging technique and conditions need to be selected depending on the specific paper property in question.

Keywords : Imaging techniques, β -radiography, Electrography,
Light transmission, Soft x-radiography

1. 結 言

地合は紙の外観に関係するのみでなく、強度、不透明度、印刷適性など紙の諸性質に大きな影響を及ぼすことが知られている。このため、地合を定量化しようとする試みが数多く行われてきた。地合の定量化に際しては、まず地合を質量画像に変換する必要がある、

このための方法として光透過法^{1)~13)}、レーザー光透過法^{14)~16)}、 α 線ラジオグラフィ法¹⁷⁾、 β 線ラジオグラフィ法^{7),18)~30)}、 β 線透過法^{10)~11),31)~36)}、軟X線ラジオグラフィ法^{37)~41)}、エレクトログラフ法⁴²⁾などが提案されている。これらの方法は別々の研究者により研究されてきたため、光透過法との比較検討^{7),10)~11)}は行われているものの、各方法の相互比較はほとんど試みられたこと

はなかった。

本研究では新聞用紙を供試し、 β 線ラジオグラフ法、エレクトログラフ法、光透過法および軟X線ラジオグラフ法の4種類の方法で得た画像について、照射線量分布の均一性、画像のコントラスト、空間分解能、質量との相関および定量化可能な坪量範囲などの画像の特性を比較することにより、各方法の特徴を明らかにすることを試みた。

2. 理論的検討

各画像作製方法に関係した理論を簡単に紹介する。

2.1 β 線の透過

β 線は連続したエネルギースペクトルを持つため、物質中における β 線の透過率 $T_{\beta\text{-ray}}$ は次のような式で表される⁴³⁾。

$$T_{\beta\text{-ray}} = e^{-\mu_{\beta} w} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 μ_{β} は β 線質量吸収係数(m^2/g)、 w はシートの坪量(g/m^2)である。

2.2 単一エネルギー電子線の透過

前報⁴⁴⁾に示したように、50–200 keVのエネルギーを持つ電子線により、紙試料の質量分布を測定することができる。ここで、電子銃から発生した電子線の試料内における減衰は次式により与えられる^{45)–47)}。

$$-\frac{dE}{dw} = \chi \frac{Z}{A_w} \{B + F(\gamma) - \delta\} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、

$$\chi = \frac{2\pi N_A r_0^2 E_0}{\beta^2}$$

$$B = \ln \left\{ \frac{\gamma^2(\gamma+2)}{2(I_{\text{ave}}/E_0)^2} \right\}$$

$$F(\gamma) = 1 - \beta^2 + \frac{\gamma^2/8 - (2\gamma+1)\ln 2}{(\gamma+1)^2}$$

さらに、

$$r_0^2 = (e^2/E_0)^2$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{(1+E/E_0)^2}}$$

$$\gamma = E/E_0$$

ここで、 E は電子のエネルギー(eV)、 Z は原子番号、 A_w は原子量(g/mole)、 δ は密度補正項、 N_A はアボガドロ数(6.0220×10^{23} electron/mole)、 E_0 は電子の静止エネルギー(0.5110 MeV)、 I_{ave} は平均イオン化エネルギー(eV)、 e は電子の電荷(1.6022×10^{-19} C)である。

PETフィルム中における電子線エネルギーの減衰を電子顕微鏡フィルムを利用して測定する場合について、モンテカルロシミュレーション^{48)–49)}を試みた結果

Fig. 1 Attenuation of electron beams in Mylar film simulated by Monte Carlo method.

を図1に示す。

2.3 光の透過

Kubelka⁵⁰⁾によれば、シート中の光透過率 T_{light} は次式で与えられる。

$$T_{\text{light}} = \frac{I}{I_0} = \frac{b}{a \sinh b s w + b \cosh b s w} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} + R_{\infty} \right)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} - R_{\infty} \right)$$

ここで、 I は透過光強度、 I_0 は入射光強度、 R_{∞} は無限厚みシートの反射率、 s はシートの散乱係数(m^2/g)である。

紙のように光を強く散乱する物質では、(3)式は次のように簡略化できる。

$$T_{\text{light}} = 2b R_{\infty} e^{-b s w} \quad \dots\dots(4)$$

2.4 軟X線の透過

エネルギーが10 keV以下の軟X線では、物質中における強度減衰が光電効果による吸収にほとんど支配されるため、軟X線の透過率 $T_{X\text{-ray}}$ は次のような式で表される⁵¹⁾。

$$T_{X\text{-ray}} = e^{-\mu_x w} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 μ_x は軟X線質量吸収係数(m^2/g)である。

2.5 坪量検査線

光学濃度 A が線量強度 I と照射時間 t の積に対して直線関係にあるような、感度特性の写真フィルムにより試料の β 線ラジオグラフを作製する場合、次式が成立する。

$$A = A_{\infty} + k I t \quad \dots\dots(6)$$

ここで, A_{∞} はバックグラウンド部分 ($w=\infty$ の場合) の光学濃度であり, k は定数である。(1)および(6)式より次のような関係が得られる。

$$A = A_{\infty} + ce^{-\mu_{\beta}w} \quad \cdots(7)$$

ここで, $c (=kI_0t)$ は時定数である。また, ブランク露光の場合についても次のような関係が得られる。

$$A_0 = A_{\infty} + c \quad \cdots(8)$$

ここで, A_0 はブランク露光部分 ($w=0$ の場合) の光学濃度である。(7)および(8)式より次式が得られる。

$$\frac{A - A_{\infty}}{A_0 - A_{\infty}} = e^{-\mu_{\beta}w} \quad \cdots(9)$$

また, 同様に光透過像および軟X線ラジオグラフについても以下のような関係が成立する。

$$\frac{A - A_{\infty}}{A_0 - A_{\infty}} = e^{-b_{sw}} \quad \cdots(10)$$

$$\frac{A - A_{\infty}}{A_0 - A_{\infty}} = e^{-\mu_x w} \quad \cdots(11)$$

標準的な新聞用紙について求めた以下に示す各パラメータの値を(9), (10)および(11)式に代入すると, 各画像作製方法について理論的な坪量検量線が得られる (図2)。

$$\mu_{\beta} = 0.029 \text{ m}^2/\text{g} \quad (^{14}\text{C} \beta \text{ 線の場合})$$

$$b = 0.59$$

Fig. 2 Comparison of theoretical basis weight calibration curves.

Table 1 Comparison of exposure time of four different imaging techniques.

Technique	Exposure time (seconds)	Condition
β -radiography	18,000	$^{14}\text{C} \beta$ -source, 6.17 mCi
Electrography	1.4	80 keV, 30 pA/cm ²
Light transmission	0.6	60V, 10% intensity
Soft x-radiography	930	6 kVp, 4 mA

$$s = 0.052 \text{ m}^2/\text{g}$$

$$\mu_x = 0.002 \text{ m}^2/\text{g}$$

(管球電圧 6 kVp の軟 X 線の場合)

また, エネルギー 80 keV の電子線を使用した場合の理論的な坪量検量線は, モンテカルロ法により計算し図 2 に示した。

3. 試料および実験方法

3.1 試料

ツインワイヤー抄紙機で製造した坪量 46.9 g/m² の新聞用紙を供試した。なお, 55×55 mm の四隅に正確な位置合わせを可能にするため, 0.2 mmφ の穴をあけ試料とした。

3.2 濃淡画像の作製

各方法による濃淡画像の作製は, フィルム (三菱電子顕微鏡フィルム) 上に試料と坪量校正用ステップウエッジをのせ, 表 1 に示した条件で露光し, 20℃ で 4 分間 (ゲッコール) 現像処理することにより行った。

β 線ラジオグラフの撮影には ^{14}C ラベル化プラスチック β 線源 (Amersham 社製 ^{14}C -polymer reference source, 放射能強度 6.17 mCi), エレクトログラフの撮影には透過型電子顕微鏡 (日本電子社製 JEM-2000 EX 型), 光透過像の撮影には密着露光機 (Industrial Time 社製 Time-O-Lite 型), 軟 X 線ラジオグラフの撮影には軟 X 線発生装置 (Softex 社製 CMR 型) をそれぞれ使用した。

3.3 フィルムのデジタル画像化

得られた各濃淡画像は, ドラムスキャナ (Optronics 社製 Photomation System P-1700 型) により, スポットサイズ 0.1×0.1 mm の条件で 256 階調にデジタル化し, ワークステーション (Sun 3/110) へ転送した。

3.4 坪量校正

デジタル画像中のステップウエッジ部分の光学濃度から, 坪量と光学濃度の関係式を求めて坪量校正を行い, 試料の質量画像を得た。各画像作製方法により得られた質量画像から, それぞれ同一位置に対応する 512×512 画素の質量画像を取り出し, 各画像の特性比

較を行った。

4. 結果および考察

4.1 露光時間

表1には各画像作製方法で画像を得るための最適露光時間を示す。各方法で最適露光時間が異なるが、これはフィルムの各照射線に対する感度の差より、線源の強度の差に依存するところが大きいと考えられる。 β 線ラジオグラフィ法の場合は、作製可能なプラスチック β 線源の放射能強度に限界があるため、露光時間の短縮にも限りがある。高感度フィルムの使用により若干の露光時間短縮は可能であるが、この種のフィルムは銀塩粒子が粗いため画像の空間分解能が低下する。また、軟X線ラジオグラフィ法の場合は、さらに高出力の線源を使用することも可能であるが、その場合も本研究で使用した装置の10倍程度の出力しか期待できない。一方、エレクトログラフ法および光透過法の場合は、前二者に比べて高出力の電子銃あるいは光源を使用できるため、露光時間を短縮できる点で有利であると考えられる。

4.2 線量強度分布の均一性

線量強度分布が不均一であると、露光後のフィルムの光学濃度に変動を生じ、坪量校正時に誤差の原因になる。表2には試料をのせずに各方法で露光(ブランク露光)したフィルム(60×60 mm)中の各点の光学濃度の平均値と変動係数を示す。この結果から、軟X線ラジオグラフィの変動係数が他の三者に比べて大きいことが認められる。これは、Farrington⁴¹⁾が指摘しているようなX線管のターゲットと試料のなす角度により生じる幾何学的なヒール効果に起因すると考えられる。Farringtonは比較的小さな試料を使用し、X線管と試料間の距離を最小限にすることにより、ヒール効果を軽減させている。また、湯原ら⁴⁰⁾はブランク露光フィルムの各点の光学濃度変動を前もって測定し、

Table 2 Comparison of spatial variation in intensities of four different imaging techniques.

Technique	Mean optical density	Coefficient of variation (%)
β -radiography (^{14}C β -source)	1.25	1.23
Electrography (80 keV)	1.50	1.07
Light transmission	1.17	0.74
Soft x-radiography (6 kVp)	1.53	2.84

Before shading correction

After shading correction

Fig. 3 Result of shading correction for soft x-radiograph.

試料画像から差し引くことにより、ヒール効果を除去している(シェーディング補正)。しかし、紙試料では軟X線の質量吸収係数が小さく、軟X線ラジオグラフィのコントラストが非常に低いため、種々の方法でヒール効果を軽減させたとしても、ヒール効果によるフィルム光学濃度の変動は坪量校正における誤差の原因になりうる。したがって、画像のコントラストを向上させるために、さらに長波長の軟X線を使用することにより紙試料の質量吸収係数を高くしたり、コントラストの高いフィルムを使用するなどの撮影条件の最適化⁵²⁾が必要と考えられる。

本研究では湯原ら⁴⁰⁾のフィルム光学濃度の差し引き演算法により、ヒール効果を除去した。図3には軟X線ラジオグラフィにおけるシェーディング補正の例を示す。

4.3 画像のコントラスト

各画像作製方法により撮影した新聞用紙のデジタル画像を図4に示す。平均濃度が若干異なるため厳密な比較は難しいが、光透過像のコントラストが最も高いように思われる。図5には坪量校正用のステップウェッジ部の光学濃度から求めた坪量検量線を示す。この坪量検量線は図2の理論的な坪量検量線とよく一致する。坪量検量線の坪量0と50 g/m²に対応する光学濃度の比を画像のコントラストとして用いた。理論的および実測坪量検量線について求めた各画像のコントラストを表3に示す。本研究の撮影条件では、4種類の画像作製方法の中で光透過像のコントラストが最も高く、軟X線ラジオグラフィのコントラストの最も低いことが認められる。したがって、坪量校正精度は光透過像が最も高く、軟X線ラジオグラフィが最も低いことになる。正確な坪量を必要とする測定ではコントラストの高い画像が必要なので、特に軟X線ラジオグラフィの場合には、前述のような撮影条件の最適化による

β -radiograph

Electrograph

Light transmission image

Soft x-radiograph

Fig. 4 Comparison of images obtained with different imaging techniques.

Fig. 5 Comparison of experimental basis weight calibration curves.

コントラストの向上が重要と考えられる。

坪量校正精度に関しては、坪量検量線の形が大きな影響を及ぼす。前述(図5)のように、 β 線や光の透過率は指数関数的に変化し、坪量検量線の傾きは坪量が高くなるにしたがってゆるやかになる。すなわち、低坪量領域においては坪量校正精度が高いが、高坪量領域においては精度が低いことを示している。各坪量において同等の坪量校正精度を得るためには、直線的な坪量検量線を得ることが必要である。

Table 3 Comparison of image contrast of four different imaging techniques.

Technique	Theoretical contrast ($\text{OD}_{0\text{ g/m}^2}/\text{OD}_{50\text{ g/m}^2}$)	Experimental contrast ($\text{OD}_{0\text{ g/m}^2}/\text{OD}_{50\text{ g/m}^2}$)
β -radiography (^{14}C β -source)	4.17	3.45
Electrography (80 keV)	2.22	1.30
Light transmission	4.76	6.67
Soft x-radiography (6 kVp)	1.10	1.08

Table 4 Comparison of measurable basis weight range of four different imaging techniques.

Technique	Minimum basis weight (g/m^2)	Maximum basis weight (g/m^2)
β -radiography (^{14}C β -source)	0	150
Electrography (80 keV)	20	110
Light transmission	0	120
Soft x-radiography (6 kVp)	0	2,300

4.4 坪量測定範囲

各画像作製方法の坪量検量線(図5)から、それぞれの方法で測定可能な坪量範囲を計算し表4の結果を得た。ここで、最低坪量とは各坪量検量線の傾きが負になり始める坪量、また最高坪量とは各照射線の透過率が1%以下になる坪量のことである。この結果から、軟X線ラジオグラフィ法は測定可能な坪量範囲の最も広いことが明らかである。エレクトログラフ法の場合には、坪量検量線にピークが存在するため、実際に測定可能な坪量範囲がピークから尾までの狭い範囲に限定される。しかし、この方法の場合は図1に示したように、電子線エネルギーを変化させることにより、測定可能な坪量範囲をさらに広げられる利点がある。

4.5 画像の解像度

各画像作製方法により得た濃淡画像の解像度を種々の方法で比較した。まず、図6に示すように、坪量 39.7 g/m^2 の新聞用紙の上面と下面に $25\text{ }\mu\text{m}\phi$ のステンレスワイヤーを粘着テープで貼り付けた試料を作製し、この試料を各方法で撮影した。得られた画像を図7に示す。写真の右側の黒線が紙の上面、左側が下面に貼り付けたステンレスワイヤーの像である。両者の比較から画像の解像度も評価した結果、軟X線ラジオ

Fig. 6 Imaging of stainless steel wires fixed on a paper sample.

Fig. 7 Comparison of spatial resolution with the image of stainless steel wires.

グラフの解像度の最も高いことが認められる。一方、 β 線ラジオグラフ、エレクトログラフおよび光透過像では、フィルム乳剤面に近い物体はほぼ正確に形状が再現されるが、フィルム乳剤面から離れた物体では、散乱の影響により正確な形状が再現されず、解像度の低下することが予測される。同様の結果は Gorres³⁰⁾らの実験によっても認められている。

さらに、各方法により得た画像の解像度をフーリエパワースペクトルを利用して比較した。この場合は解像度の高い画像ほど、そのフーリエパワースペクトル中に高周波成分を多く含むことを利用した。図8には各画像の高周波フィルター処理後のフーリエパワースペクトルを示す。各写真の周辺部が高周波成分に相当するが、この部分が白い(高周波成分が多い)ほど解像度は高いと考えられる。軟X線ラジオグラフの解像

Fig. 8 Comparison of two-dimensional Fourier power spectra.

度が最も高く、次いでエレクトログラフ、 β 線ラジオグラフ、光透過像の順に解像度の低くなることが認められる。

このような各画像間の解像度の差は各照射線のエネルギー減衰過程の違いに起因する。すなわち、 β 線、低エネルギー領域の電子線および可視光線は試料中에서도散乱により減衰する。一方、低エネルギー領域の軟X線は、光電効果にもとづく吸収により減衰するため、散乱が減衰の主要因である他の方法に比べて解像度の高い画像を与えるものと考えられる。

4.6 質量との相関

図9には各画像作製方法により得た新聞用紙の濃淡画像から濃度を坪量換算して求めた質量画像を示す。各質量画像は互いに類似しているように見える。質量画像間の類似性を調べるために、それぞれの画像について画素サイズを 0.1×0.1 mm から 0.8×0.8 mm まで変化したマップを作製し、各画素サイズごとに各画像作製方法で得られたマップの坪量比較を行った。なお、拡大画素サイズにおける坪量は、隣接する4画素の値を単純平均することにより求めた。画素サイズ 0.2×0.2 mm の質量画像間での対応する画素ごとの坪量比較結果を、結合確率密度分布図の形で図10に示した。 β 線ラジオグラフ、エレクトログラフ、光透過像から得た質量画像の比較では、結合確率密度分布図の

アスペクト比が高く、互いに類似していると考えられるが、軟X線ラジオグラフと他の3種の質量画像間の比較では、アスペクト比が低く類似性の低いことが認められる。

さらに、4種類の質量画像から順番に2つずつ抽出し、相互相関係数Rの計算も試みた。ただし、 $M \times N$ 画

素のサイズと持つ2つの画像 $f(x,y)$ および $g(x,y)$ の相互相関係数Rは次式から求めた。

$$R = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \{f(x,y) - \bar{f}(x,y)\} \cdot \{g(x,y) - \bar{g}(x,y)\}}{\left[\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \{f(x,y) - \bar{f}(x,y)\}^2 \cdot \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \{g(x,y) - \bar{g}(x,y)\}^2 \right]^{1/2}} \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 $\bar{f}(x,y)$ および $\bar{g}(x,y)$ はそれぞれ $f(x,y)$ および $g(x,y)$ の平均値である。計算結果を表5に示す。 β 線ラジオグラフ、エレクトログラフ、光透過像から得た質量画像相互の相関係数はいずれも0.7以上であり、互いに類似していると考えられるが、軟X線ラジオグラフから得た質量画像と他の3種の質量画像間の相互係数は小さく類似性の低いことが認められる。また、画素サイズが大きくなるに伴って各画像作製方法により得た質量画像間の類似性の高くなる傾向が認められる。これは、画素サイズが大きくなるにしたがって各方法による画像の解像度の影響を受けにくくなるためと推測される。

村田ら⁷⁾、Komppaら¹⁰⁾およびDemeyer¹¹⁾らは紙試料の場合、密度や表面粗さなどのシート構造の変化が質量分布の画像再現性に影響をおよぼす可能性のあることを指摘している。そこで、ワイヤーマークを利用してこのようなシート構造の変化が質量分布の画像再現性におよぼす影響について検討した。ワイヤーマークの抽出に関してはPraastら⁵³⁾の方法があるが、本研

Fig. 9 Comparison of digital basis weight maps.

Table 5 Cross correlation coefficient between the digital basis weight maps obtained with different imaging techniques at different pixel size.

Technique	Pixel size			
	0.1 mm	0.2 mm	0.4 mm	0.8 mm
β -radiography vs. Electrography	0.785	0.879	0.906	0.929
β -radiography vs. Light transmission	0.745	0.807	0.842	0.864
β -radiography vs. Soft x-radiography	0.385	0.527	0.598	0.658
Electrography vs. Light transmission	0.595	0.706	0.787	0.819
Electrography vs. Soft x-radiography	0.315	0.464	0.556	0.584
Light transmission vs. Soft x-radiography	0.345	0.446	0.490	0.535

Fig. 10 Correlation between different images at 0.2 mm pixel size.

究ではワイヤーマーク抽出操作において実際に存在しない成分による誤差を最小にするため Appendix に示す方法を用いた。表 6 は各画像作製方法により得た画像のワイヤーマーク部分の坪量標準偏差と坪量範囲(最大坪量-最少坪量)の計算結果である。光透過像の

標準偏差が最も大きく、ワイヤーマークの影響の強く現われることが認められる。一方、軟 X 線ラジオグラフの標準偏差は最も小さく、ワイヤーマークの影響の弱く現われることが認められる。これは上述のように各照射線の強度減衰過程の違いによるものと考えられ

Table 6 Comparison of standard deviation and the basis weight range of wiremarks of four different imaging techniques.

Technique	Standard deviation	Basis weight range (g/m ²)
β -radiography (¹⁴ C β -source)	2.471	34
Electrography (80 keV)	2.418	33
Light transmission	2.574	40
Soft x-radiography (6 kVp)	1.908	25

る。 β 線ラジオグラフィ法、エレクトログラフ法、光透過法のように散乱により強度減衰が支配される方法では、密度や表面粗さなどのシート構造の微細な変化を敏感に検出しうることが明らかになった。

4.7 地合評価

各画像作製方法により得た新聞用紙の質量画像について、 0.1×0.1 mm から 0.8×0.8 mm の異なる画素サイズでの種々の地合パラメータを算出しその結果を比較した。地合評価用のパラメータとしては変動係数、比周囲長⁵⁴⁾、平均フロックサイズ⁵⁵⁾などを使用した。各パラメータの計算結果をそれぞれ図 11, 12 および 13 に示す。

これらの結果から、 0.1×0.1 mm 程度の小さな画素サイズでは、各方法により得た画像の地合パラメータの値が大きく異なるが、画素サイズが大きくなるにつれてその差の小さくなることが認められる。これは各方法の解像度の差に起因すると考えられる。

図 13 の平均フロックサイズの場合、画素サイズが大きくなると平均フロックサイズの大きくなる傾向にあ

Fig. 11 Comparison of coefficient of variation at different pixel size.

Fig. 12 Comparison of specific perimeter at different pixel size.

Fig. 13 Comparison of average floc size at different pixel size.

るが、とくに軟X線ラジオグラフィではその傾向が他の三者より顕著である。前述のように β 線ラジオグラフィ、エレクトログラフおよび光透過法は、シート構造の微細な変化に敏感であるため、たとえばワイヤマークの影響が強く現われる場合には、フロックがワイヤマークにより分断されるなどして、見かけの平均フロックサイズが小さく測定される傾向にある。軟X線ラジオグラフィではそのような影響が小さいため、フロックの大きさそのものが測定されると推測される。

5. 結 論

以上述べてきた4種類の画像作製方法を比較した一覧表を表7に示す。 β 線ラジオグラフィ法は、解像度の点で軟X線ラジオグラフィ法に劣るが、一般的な地合測定には充分利用可能であること、エレクトログラフ法は露光時間および解像度の点で β 線ラジオグラフィ法よ

Table 7 Comparison of the four imaging techniques.

Parameters	β -radiography (^{14}C β -source)	Electrography (50—200 kV)	Light transmission	Soft x-radiography (3—8 kVp)
Exposure time	2—24 hr.	0.1—1 sec.	< 0.1 sec.	5—30 min.
Spatial variation	< 5 %	< 5 %	< 3 %	< 20%
Contrast	medium	medium	high	low
Basis weight range	0—150 g/m ²	0—400 g/m ²	0—120 g/m ²	0—10,000 g/m ²
Spatial resolution	medium	medium	low	high
Correlation with mass	excellent	excellent	good	excellent
Influence of sheet structure	less sensitive	less sensitive	very sensitive	insensitive
Safety	poor	fair	excellent	fair

りも有利であること、光透過法は解像度が低く密度や着色の影響を受けやすいが、非常に迅速で簡便であり比較的大きなシート構造の変化を調べる場合に好適であること、および軟X線ラジオグラフィ法はワイヤーマークを有する試料の質量分布を測定する場合などに好適であることなどが明らかになった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、透過型電子顕微鏡使用の便宜を計っていただいたニューヨーク州立大学環境科学および森林学部の Dr. Robert B. Hanna と Mr. Arnold C. Day に深く感謝いたします。また、モンテカルロシミュレーションを行っていただいたカナダナショナルリサーチカウンスル物理部門の Dr. Alex F. Bielajew に深く感謝の意を表します。

Appendix : ワイヤーマーク抽出方法

原画像 $g(x, y)$ フーリエパワースペクトル $G(u, v)$ を2次元離散フーリエ変換により求める。

$$G(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) e^{-2\pi j(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad \dots\dots(13)$$

ここで、 $x=0, 1, 2, \dots, M-1$, $y=0, 1, 2, \dots, N-1$, $u=0, 1, 2, \dots, M-1$ および $v=0, 1, 2, \dots, N-1$ である。つぎに、高周波成分を強調するために、フーリエパワースペクトル $G(u, v)$ を高周波フィルター $E(u, v)$ で処理する。

$$G'(u, v) = E(u, v)G(u, v) \quad \dots\dots(14)$$

高周波フィルター処理したフーリエパワースペクトル $G'(u, v)$ において、ワイヤーマークに相当する顕著なピークを抽出し、このピークの位置情報にもとづいてバンドパスフィルター $H(u, v)$ を作成する。さらに、ワイヤーマーク画像のフーリエパワースペクトル $P(u, v)$ を得るために、原画像のフーリエパワースペクトル $G(u, v)$ をバンドパスフィルター $H(u, v)$ で処理する。

$$P(u, v) = H(u, v)G(u, v) \quad \dots\dots(15)$$

そして、ワイヤーマーク画像のフーリエパワースペ

クトル $P(u, v)$ を2次元離散逆フーリエ変換することにより、ワイヤーマーク画像 $p(x, y)$ が得られる。

$$p(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} P(u, v) e^{2\pi j(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad \dots\dots(16)$$

ここで、実際に原画像中に存在しない成分による誤差を最小にするため、重み係数 $w(x, y)$ を導入する⁵⁶⁾。重み係数は、ワイヤーマークを含まない推定画像 $\hat{f}(x, y)$ の一定サイズの近傍 ($-X \leq m \leq X$, $-Y \leq n \leq Y$) 内における分散が最小になるように選択する。ワイヤーマークを含まない推定画像 $\hat{f}(x, y)$ は次式で与えられる。

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y) - w(x, y)p(x, y) \quad \dots\dots(17)$$

座標 (x, y) の周辺において、 $(2X+1) \times (2Y+1)$ のサイズの領域を考えると、座標 (x, y) におけるワイヤーマークを含まない推定画像の分散 $\sigma^2(x, y)$ は次式で与えられる。

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y \{ \hat{f}(x, m, y+n) - \hat{f}(x, y) \}^2 \quad \dots\dots(18)$$

ただし、

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y \hat{f}(x+m, y+n)$$

$$m = -X, -X+1, \dots, X$$

$$n = -Y, -Y+1, \dots, Y$$

(17)および(18)式より次のような関係が得られる。

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y [g(x+m, y+n) - w(x+m, y+n)p(x+m, y+n) - \{\bar{g}(x, y) - w(x, y)p(x, y)\}]^2 \quad \dots\dots(19)$$

ただし、

$$\bar{g}(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y g(x+m, y+n)$$

$$\overline{w(x, y)p(x, y)} = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y w(x+m, y+n)p(x+m, y+n)$$

重み係数 $w(x, y)$ が $(2X+1) \times (2Y+1)$ のサイズの領域内で一定であると仮定すると, その領域内では次式が成り立つ。

$$w(x+m, y+n) = w(x, y) \quad \cdots \cdots (20)$$

また, $-X \leq m \leq X, -Y \leq n \leq Y$ においては,

$$\overline{w(x, y)p(x, y)} = w(x, y)\bar{p}(x, y) \quad \cdots \cdots (21)$$

ただし,

$$\bar{p}(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \cdot \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y p(x+m, y+n)$$

これらの近似により次式が得られる。

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y \{ [g(x+m, y+n) - w(x, y)p(x+m, y+n)] - [\bar{g}(x, y) - w(x, y)\bar{p}(x, y)]^2 \} \quad \cdots \cdots (22)$$

推定画像の分散 $\sigma^2(x, y)$ を最小にするためには, 次の微分方程式を重み係数 $w(x, y)$ について解けばよい。

$$\frac{\partial \sigma^2(x, y)}{\partial w(x, y)} = 0 \quad \cdots \cdots (23)$$

そして, 重み係数 $w(x, y)$ は次のように求められる。

$$w(x, y) = \frac{g(x, y)\bar{p}(x, y) - \bar{g}(x, y)\bar{p}(x, y)}{\bar{p}^2(x, y) - \bar{p}^2(x, y)} \quad \cdots \cdots (24)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \overline{g(x, y)p(x, y)} &= \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \cdot \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y g(x+m, y+n) \cdot p(x+m, y+n) \\ \bar{p}^2(x, y) &= \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y \{p(x+m, y+n)\}^2 \\ \bar{p}^2(x, y) &= \left\{ \frac{1}{(2X+1)(2Y+1)} \sum_{m=-X}^X \sum_{n=-Y}^Y p(x+m, y+n) \right\}^2 \end{aligned}$$

したがって, 補正されたワイヤーマーク画像 $p'(x, y)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} p'(x, y) &= w(x, y)p(x, y) \\ &= \frac{p(x, y)\{g(x, y)\bar{p}(x, y) - \bar{g}(x, y)\bar{p}(x, y)\}}{\bar{p}^2(x, y) - \bar{p}^2(x, y)} \quad \cdots \cdots (25) \end{aligned}$$

参考文献

1) Davis, M. N., Roehr, W. W and Malmstroem, H.

- E.; Paper Trade J., 101 (4), 31 (1935)
- 2) Glover, G. F. and Rancer, H. F.; Technical Section BP & BMA, 247 (1953)
- 3) Andersson, O. and Sundewall, K.; Svensk Papperstidning, 63 (6), 167 (1960)
- 4) Burkhard, G. Wrist, P. E., and Mounce, G. R.; Pulp and Paper Mag. of Canada, 61 (6), T 319 (1960)
- 5) Brecht, W. and Volk, W.; Das Papier, 16 (7), 272 (1962)
- 6) Kallmes, O. J.; Paper Trade J., 115 (43), 46 (1971)
- 7) 村田正男, 中田幸次郎; 紙パ技協誌, 26 (2), 13 (1972)
- 8) McLeod, M. M. and Manning, J. H.; "Cambridge Instruments Application Note #5", 1978
- 9) Nobleza, G. C. and Lamonde, J. P.; Pulp and Paper Mag. of Canada, 81 (1), 90 (1980)
- 10) Komppa, A. and Ebeling, K.; Technical Section BP & BMA, 603 (1981)
- 11) Demeyer, M. F.; M. Sc. Thesis, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, 1982
- 12) Schwab, O.; Wochenblatt fur Papierfabrikation, 110 (4), 109 (1982)
- 13) Trepanier, R. J., Hodgson, P. W., and Ouellette, R. J.; Proceedings of 1985 Pulp and Paper Technology Conference, 1985, p. 191
- 14) Boulay, R., Drouin, B., and Izatt, J. R.; J. of Pulp and Paper Science, 10 (7), J 98 (1984)
- 15) Landmark, P. and Joensberg, C.; Paper Trade J., 168 (15), 84 (1984)
- 16) Hatig, W.; Das Papier, 39 (6), 261 (1985)
- 17) Brazington, E. J. and Radvan, B.; Tappi J., 42 (7), 545 (1959)
- 18) Parker, J. R. and Attwood, D.; Paper Technology, 2 (5), T 191 (1961)
- 19) Attwood, D. and Parker, J. R.; Paper Technology, 3 (5), 435 (1962)
- 20) Tydeman, P. A.; Papermaker, 153 (6), 42 (1967)
- 21) Corte, H.; Das Papier, 23 (7), 381 (1969)
- 22) Corte, H.; Das Papier, 24 (5), 261 (1970)
- 23) Hellawell, J. M.; Paper Technology, 14 (2), T 12 (1973)
- 24) 村田正男, 中田幸次郎, 遠藤恭延; 紙パ技協誌, 26 (1), 26 (1972)

- 25) Norman, B. and Wahren, D. ; Technical Section BP & BMA, 1 (1973)
- 26) Yang, C. and Thorpe, J. ; Tappi J., 60 (12), 141 (1977)
- 27) Sara, H. ; Ph. D. Thesis, University of Helsinki, Finland, 1978
- 28) Bergh, P. A. ; M. Sc. Thesis, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, 1981
- 29) Murata, M. and Nakata, K. ; Proceedings of 1981 Papermaking Conference, Tokyo, 1981, p. 247
- 30) Gorres, J. ; Ph. D. Thesis, University of Manchester, England, 1983
- 31) Sadtler, J. D. and Borofsky, H. ; Tappi J., 38 (8), 494 (1955)
- 32) Balodis, V. ; Appita, 18 (5), 184 (1965)
- 33) Sandermann, W., Schweers, W., and Wendeborn, W. ; Das Papier 20 (3), 117 (1966)
- 34) Aaltonen, P. and Simola, J. ; Paperi ja Puu, (9), 479 (1971)
- 35) Herdman, P. T. and Corte, H. ; J. of Pulp and Paper Science, 81 (10), T 261 (1980)
- 36) Gottsching, L. ; Proceedings of 1981 Papermaking Conference, Tokyo, 1981, p. 233
- 37) Pelgroms, J. D. ; Paper Trade J., 134 (1), 25 (1952)
- 38) Newman, S. B. and Fletcher, D. ; Tappi J., 47 (4), 177 (1964)
- 39) Anttila, K. ; Personal Correspondence
- 40) 湯原 隆, 蓮池牧雄, 村上浩二 ; 紙バ技術協誌, 40 (1), 85 (1986)
- 41) Farrington, T. E., Jr. ; Tappi J., 71 (5), 140 (1988)
- 42) Tomimasu, H., Luner, P., and Hanna, R. B. ; "Fundamentals of Paper Making Vol.1", Mechanical Engineering Publications, London, 1989, p. 159
- 43) Mladjenovic, M. ; "Radioisotope and Radiation Physics", Academic Press, New York, 1973
- 44) 富増 弘, Luner, P. ; 紙バ技協誌, 44 (9), 59 (1990)
- 45) Birkhoff, R. D. ; "Encyclopedia of Physics", Springer-Verlag, Berlin, 1958, p.53
- 46) Rorlich, F. and Carlson, B. C. ; Physical Review, 93 (1), 38 (1954)
- 47) Berger, M. J. and Seltzer, S. M. ; NAS-NRC Publication, 1133 (10), (1964)
- 48) Bishop, H. E. ; British J. of Applied Physics, 18, 703 (1967)
- 49) Bielajew, A. F. and Rogers, D. W. O. ; National Research Council of Canada, Division of Physics, Report No.042, Ottawa, July (1986)
- 50) Kubelka, P. ; J. of the Optical Society of America, 38 (5), 448 (1948)
- 51) Bryant, L. E. and McIntire, P. ; "Nondestructive Testing Handbook, Vol.3 Radiography and Radiation Testing" American Society for Nondestructive Testing, Columbus, 1986
- 52) 蓮池牧雄 ; 紙バ技協誌, 43 (3), 263 (1989)
- 53) Praast, H. and Gottsching, L. ; Das Papier, 41 (3), 105 (1987)
- 54) Jordan, B. D. and Nguyen, N. G. ; Paperi ja Puu, (6-7), 476 (1986)
- 55) 湯原 隆, 蓮池牧雄, 村上浩二 ; 紙バ技協誌, 40 (10), 51 (1986)
- 56) Gonzalez, R. C. and Wintz, P. ; "Digital Image Processing Second Edition", Addison-Wesley Pub. Co., Massachusetts, 1987

(受理 : '90. 8. 15)