エレクトログラフ法による紙試料の質量分布測定 (第4報) エレクトログラフ法による塗工量分布の測定

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 (4) Measurement of Coating Weight Distribution by Electrography Technique

Hiroshi Tomimasu

Mitsubishi Paper Mills, Ltd., Central Research Laboratory

Philip Luner

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

A new method using electron beams was developed to measure the coating weight distribution in a large sample area with a high resolution. Paper samples before and after coating were irradiated with electron beams between 50 and 200 keV generated by an electron gun, and electrographs were obtained on a film. The images were digitized by a drum scanner, and the difference between these images were calculated at different pixel sizes (0.1—1.6 mm) with an image analyzer to measure the coating weight distribution. With this method, the effect of the basis weight distribution of the basestock on the coating weight distribution was examined. The effect of the surface roughness of the basestock was studied at the same time using profilometry. The results showed that on a fine scale, the surface roughness of the basestock controls the coating weight distribution. On a large scale, the basis weight distribution of the basestock controls the paper surface roughness. Consequently, the coating weight distribution is affected by the basis weight distribution of the basestock. The results also showed that the type of furnish (softwood or hardwood) and wire marks of the basestock have a significant influence on the coating weight distribution.

Keywords : Coating weight distribution, Basestock, Formation, Surface roughness, Electrography, Image analysis, Wire mark

1. 結 言

塗工紙は繊維がランダムに分布したネットワーク(原紙)上に塗工層を設けることにより成り立っている。したがって、原紙の構造は塗工層の構造、さらには塗工紙の印刷適性にも影響することが知られている^{1),2)}。例えば、原紙の空隙構造は塗工時の水の吸収性

を支配し、塗工層の構造を決定すると考えられるが、EklundとPalsanen³⁾、Lepoutre⁴⁾、EngströmとRig Dahl⁵⁾らは異なる空隙構造を持つ原紙では塗工層の構造が異なることを明らかにしている。また、原紙の表面粗さがブレード塗工した塗工層厚さの変動に影響を及ぼすことも指摘されている。紙中で塗工層厚さが変動することは印刷光沢、インクセット、オフセッ

ト印刷におけるモトリングなどの印刷適性や不透明度、白色度、白紙光沢などの光学特性に対して大きな影響を及ぼすため、厚さ分布の幅を小さくすることが望まれている。

塗工層厚さの分布測定は塗工紙断面切片の光学顕微鏡^{6),7)}、紫外線顕微鏡⁸⁾、透過型電子顕微鏡⁹⁾、走査型電子顕微鏡^{10)~12)}などによる像を計測することにより行われている。最近、Gane と Hooper^{13),14)}は画像解析装置を利用して断面切片像から塗工層厚さの分布を測定する方法を開発し、オフセット印刷におけるモトリングと塗工層厚さの分布の間に相関のあることを明らかにしている。しかし、彼らの方法によっても試料のごく一部分しか測定できず、試料全体にわたる塗工層厚さの分布測定は困難であった。

原紙構造と塗工層構造の関係を定量的に調べるには、短時間で高解像度かつ大試料面積の塗工層厚さの分布(塗工量分布)を測定できる方法が望ましい。塗工紙の質量分布の分散から原紙の質量分布の分散を差し引いて塗工量分布の分散を求めることも試みられているが¹⁵⁾、この方法では十分な結果が得られていない。すなわち、塗工前後で試料各位置における質量分布をそれぞれ測定し、同一位置の値について差し引き演算を行って塗工量分布を求めることが必要と考えられる。

前報で述べたように^{16),17)}、紙の質量分布は電子銃から発生するエネルギー50~200 keVの電子線により測定することができる。この方法では、紙を透過した電子線を電子顕微鏡フィルムで検出してエレクトログラフを得るため、0.1 mm 程度の高解像度で紙の質量分布が測定される。この方法を利用して塗工紙の質量分布から原紙の質量分布を差し引けば、塗工量分布の測定が可能であると考えた。

本研究ではパルプ配合の異なる手抄き紙と種々の抄紙機で製造した新聞用紙を供試し、電子線による質量分布測定法と触針式表面粗さ測定法を利用して原紙の質量分布と表面粗さが塗工量分布に及ぼす影響について検討した。

2. 測定原理

2.1 電子線の減衰

前報¹⁷⁾に示したように、電子銃から発生した電子線の試料中における減衰は Bethe の stopping power 理論¹⁸⁾から求められる。図1にはモンテカルロシミュレーション¹⁹⁾により求めた塗工紙中の各成分による電子線の減衰挙動を示す。セルロースに比較すると塗工層のクレイや炭酸カルシウムによる減衰の小さいことが認められる。

Fig. 1 Energy attenuation curve of electron beams of 80 keV in various materials.

2.2 フィルムの光学濃度と濃度値

得られる光学濃度が線量強度 (I) と照射時間 (t) の積に比例する写真フィルムを用いて試料のエレクトログラフを作製する場合、次式が成立する。

$$A = A_{\infty} + kIt \quad \cdots(1)$$

ここで、 A は試料部分の光学濃度、 A_{∞} はバックグラウンド部分(坪量 $=\infty$ の場合)の光学濃度、 k は定数である。また、試料を置かないブランク露光の場合についても同様の関係が得られる。

$$A_0 = A_{\infty} + kI_0t \quad \cdots(2)$$

ここで、 A_0 はブランク露光部分(坪量 $=0$ の場合)の光学濃度、 I_0 は入射線量強度である。(1)および(2)式より、電子線の透過率 (T) は次式で求められる。

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{A - A_{\infty}}{A_0 - A_{\infty}} \quad \cdots(3)$$

フィルムの光学濃度はドラムスキャナにより濃度値 (G) に変換されるが、光学濃度と濃度値の間には次のような直線関係が成立する。

$$A = aG + b \quad \cdots(4)$$

ここで、 a および b は定数である。したがって、電子線の透過率は濃度値から次式のように表される。

$$T = \frac{G - G_{\infty}}{G_0 - G_{\infty}} \quad \cdots(5)$$

ここで、 G 、 G_0 および G_{∞} はそれぞれ試料部分、ブランク露出部分およびバックグラウンド部分の濃度値である。

3. 実 験

3.1 試 料

原紙構造が塗工量分布に及ぼす影響を調べるために用いた試料はパルプ配合が異なる3種類の手抄き紙、および種々の抄紙機で製造した4種類の新聞用紙である(表1, 2)。また、坪量校正用の標準ステップウエッジは坪量の異なるPETフィルムを組み合わせて作製し、塗工量校正用の標準試料は表面を粗面化したPETフィルム(坪量69.1 g/m²)上に塗工量を変えて塗液を塗工することにより作製した。塗液配合と塗工条件をそれぞれ表3と4に示す。

3.2 エレクトログラフ撮影

試料の塗工前後のエレクトログラフは透過型電子顕微鏡(JEOL JEM-2000 EX)により撮影した。四隅に位置合わせ用の小さな穴をあけた試料(60×60 mm)および坪量校正用の標準ステップウエッジをフィルム

(三菱電子顕微鏡フィルム)の乳剤面に接着テープで固定し、カセットに納めて露光チャンバーに導入し、表5の条件で電子線照射を行った。図2にはエレクトログラフ撮影システムの構成図を示す。露光後、フィルムは20℃で4分間(ゲッコール)現像処理を行った。

3.3 フィルムのデジタル化

撮影したエレクトログラフは、ドラムスキャナ(Optronics 社製 Photomation System P-1700 型)に

Fig. 2 Configuration of the electrography system.

Table 1 Composition of laboratory-made sheets

Sample	Furnish	Basis weight (g/m ²)
L 1	100% hardwood	55.7
L 2	70% hardwood 30% softwood	49.4
L 3	100% softwood	53.7

Hardwood : Japanese beech, oak and eucalyptus.
Softwood : hemlock, Japanese cedar and red pine.

Table 2 Newsprint samples

Sample	Former	Basis weight (g/m ²)
N 1	Twin wire	46.9
N 2	On-top wire	46.5
N 3	Fourdrinier	50.6
N 4	Fourdrinier	49.8

Furnish : a mixture of unbleached groundwood, thermomechanical and kraft pulp.

Table 4 Coating conditions

Parameter	Condition
Coating machine	Lab. blade coater
Coating speed	15 m/min
Solids content	62.0%
Drying temperature	100℃

Table 5 Electron beam exposure conditions

Parameter	Condition
Accelerating voltage	80 kV
Current density	30 pA/cm ²
Magnification	×10,000
Exposure time	1.4 seconds

Table 3 Coating formulation

Ingredients	Parts/100 Parts Pigment
Pigment (No.1 clay or ground CaCO ₃)	100
Sodium polyacrylate	0.1
SB-Latex	10
Starch	5

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、解析のためにワークステーション (Sun 3/110) へ転送した。

3.4 原紙の坪量校正

デジタル画像中の標準ステップウエッジ部分の濃度値から、坪量と濃度値の関係を求めて坪量校正を行い、PET フィルムとセルロースの電子線に対する阻止能の差の補正を行って原紙の質量画像を得た。さらに、得られた質量画像から位置合わせ用の穴を規準点として 512×512 画素 (51.2×51.2 mm) の質量画像を取り出した。

3.5 塗工量の校正

原紙の場合と同様に電子線照射を行って得られた塗工後の試料のエレクトログラフは、まず試料が全てセルロースで構成されていると仮定して坪量校正を行った。

次いで、得られた質量画像から位置合わせ用の穴を規準点として原紙と同一位置の 512×512 画素 (51.2×51.2 mm) の質量画像を取り出し、対応する位置の原紙の質量画像を差し引いた。得られた画像に対し、セルロースと塗工層の電子線に対する阻止能の差の補正を行うことにより塗工層の質量画像を得た。

3.6 原紙の表面粗さ測定

原紙の表面粗さは触針式表面粗さ計により測定した。測定条件はカットオフ値 8 mm、測定面積 30×30 mm、サンプリング間隔縦方向 0.1 mm、横方向 0.6 mm とした。測定データはインターフェースを介してパーソナルコンピュータに送りデジタル化した後、波形解析プログラム (DADISP) による統計処理を行った。

4. 結果および考察

4.1 塗工層における電子線のエネルギー減衰

塗工層における電子線エネルギーの減衰挙動を調べるため、表面を粗面処理した PET フィルム上に塗工量を変えて塗液を塗工し標準試料とした。標準試料に電子線照射を行ったフィルムを現像処理した後、各塗工量に相当する部分の光学濃度をマイクロデンシトメーター (MacBeth TD-504) で測定し、坪量に対してプロットした (図 3)。

図 3 より、同一坪量では PET フィルムよりも塗工層の方が電子線エネルギーの減衰が小さいことや顔料にカオリンを使用した場合と炭酸カルシウムを使用した場合で塗層中における電子線エネルギーの減衰に差がないことが認められる。これらの結果は図 1 の理論的な計算結果とも一致する。以下の実験では、図 3 の曲線を検量線として使用し、試料の各部分における塗

Fig. 3 Coating weight calibration curve for electron beams of 80 keV.

工量を求めた。

4.2 原紙パルプ配合の影響

塗工用原紙には NBKP と LBKP が種々の比率で配合されている。パルプ配合比率が塗工量分布に及ぼす影響を調べるために、ダイナミックシートフォーマーにより NBKP と LBKP の比率が異なる 3 種類の原紙を作製した。まず、原紙のエレクトログラフを撮影した後、カオリンを顔料として含む塗液を塗工し、再びエレクトログラフを撮影した。図 4 には、エレクトログラフ法により得られた原紙の質量分布像と塗工量分布像を示す。NBKP の原紙では、LBKP の原紙より質量分布および塗工量分布の均一性の劣ることが明らかである。

各試料について、対応する部分の原紙坪量と塗工量を比較した。画素サイズ 0.2×0.2 mm の場合について原紙坪量と塗工量の各組合せに対する生起確率を計算し、結果を結合確率密度分布図²⁰⁾の形で示した (図 5)。図 5 において、楕円の長軸の角度は原紙坪量と塗工量の相関の傾向、アスペクト比 (長軸/短軸) は両者の相関の強さ、また面積は両者の均一性を示す。図から楕円が各試料とも負の傾きを持つこと、すなわち原紙坪量の低い部分では塗工量の高いことが認められる。また、アスペクト比が LBKP を多く含む原紙で大きいことから、LBKP からなる原紙では原紙坪量と塗工量の間の負の相関の高いことが明らかである。

上記の NBKP からなる原紙と LBKP からなる原紙の違いには、質量分布以外に表面粗さの関与も考えられる。図 6 は、各原紙の表面粗さを測定した結果得られた表面プロファイルである。また、表 6 にはダイナミックシートフォーマーのマシン方向と幅方向にお

Fig. 4 Basis weight distribution and coating weight distribution of Samples L 1, L 2 and L 3.

Fig. 5 Relationship between the basis weight and coating weight at the same location for Samples L 1, L 2 and L 3 at the pixel size of 0.2×0.2 mm.

ける自乗平均平方根 (RMS) 粗さを示す。NBKP を含む原紙は LBKP からなる原紙よりも表面粗さの大きいことが認められる。NBKP と LBKP といった繊維形態の異なる原紙の場合には、質量分布と表面粗さがともに塗工量分布に大きな影響を及ぼすことが示唆される。

図 7 には、試料 L 1 について画素サイズを変化させて求めた原紙坪量と塗工量の確率密度分布図を示す。画素サイズが大きくなるに伴って楕円の面積が小さくなり、均一性の向上が認められるが、これは比較的大きなスケールよりも小さなスケールにおいて原紙坪量と塗工量の変動幅が大きいと考えられる。画素サイズの拡大に伴う楕円の形状変化は原紙坪量と塗工量が平均化される結果である。原紙坪量と塗工量の関係を詳細に検討するためには、画素サイズを変化させて

Table 6 Root mean square (RMS) surface roughness in the machine and cross-machine directions

Sample	RMS surface roughness	
	CD (μm)	MD (μm)
L 1	5.52	4.88
L 2	6.55	7.16
L 3	9.09	8.92

Fig. 6 Surface profiles of Samples L 1, L 2 and L 3.

Fig. 7 Relationship between the basis weight and coating weight at the same location at different pixel size for Sample L 1.

比較することが重要と考えられる。

4.3 原紙地合の影響

塗工用原紙は種々の抄紙機で製造されるが、オントップワイヤーやツインワイヤー抄紙機で製造された原紙と長網抄紙機で製造された原紙では地合やワイヤーマークが異なる。原紙の地合やワイヤーマークが塗工量分布に及ぼす影響を調べるために、種々のタイプの抄紙機で製造した4種類の新聞用紙を供試して塗工紙を作製した。

図8には、各試料の質量分布像と塗工量分布像を示す。オントップワイヤーやツインワイヤー抄紙機で製造した紙は長網抄紙機で製造した紙に比べてワイヤーマークは強いが、地合は良好なことが認められる。また、これらの傾向は塗工後も維持されているようである。それぞれの試料で同一位置について原紙坪量と塗工量を比較するために、画素サイズを $0.2 \times 0.2 \text{ mm}$ として対応する位置の原紙坪量と塗工量の生起確率を計算し、結果を結合確率密度分布図の形で図9に示した。異なる抄紙機で製造した紙の場合もパルプの種類が異なる手抄き紙と同様、原紙坪量と塗工量の間に負の相関が認められる。ただし、図5の場合に比べると楕円形状の違いは少ない。

表7には、これらの試料について求めた画素サイズ $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$ と $0.8 \times 0.8 \text{ mm}$ における原紙坪量および塗工量の標準偏差を示す。画素サイズが大きい場合の方が坪量と塗工量の標準偏差が良く対応すると思われる。このことは $0.8 \times 0.8 \text{ mm}$ といった比較的大きなスケールでは原紙の地合が塗工量分布に対して影響を及ぼすが、 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$ といった小さなスケールでは原紙の地合が塗工量分布に及ぼす影響が小さいことを示している。

原紙の表面粗さが塗工量分布に及ぼす影響を調べるため、Gervason²¹⁾らの方法に従って触針式表面粗さ計

Fig. 8 Basis weight distribution and coating weight distribution of Samples N 1, N 2, N 3 and N 4.

Table 7 Standard deviation of the basis weight of the basestock and the coating weight

Sample	Standard deviation			
	Pixel size $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$		Pixel size $0.8 \times 0.8 \text{ mm}$	
	Basestock	Coating	Basestock	Coating
N 1	7.48	3.67	3.59	1.11
N 2	7.49	2.90	4.25	1.13
N 3	8.50	2.85	5.03	1.18
N 4	8.68	3.90	5.10	1.23

Fig. 9 Relationship between the basis weight and coating weight at the same location for Samples N 1, N 2, N 3 and N 4 at the pixel size of 0.2×0.2 mm.

Table 8 Root mean square (RMS) of the original, coarse and fine roughness at the sampling interval of 0.1 mm

Sample	Original roughness (μm)	Coarse roughness (μm)	Fine roughness (μm)
N 1	11.98	13.46	5.21
N 2	12.21	13.88	5.03
N 3	12.53	14.48	4.85
N 4	12.64	14.63	5.50

で3次元表面粗さを測定した。なお、得られた表面粗さは以下の2つの部分に分離した。

- (1) マクロスケール表面粗さ：0.6 mm 以下の距離にある点を平均化した粗さ。
- (2) ミクロスケール表面粗さ：測定した表面粗さからマクロスケール表面粗さを差し引いた残りの表面粗さ。

図 10 には、このようにして求めた試料 N 1 のマクロスケール表面粗さとミクロスケール表面粗さを示す。マクロスケール表面粗さでは主として数 mm 以上の凹凸を、ミクロスケール表面粗さでは 1 mm 以下の凹凸を評価している様子が明らかである。また、表 8 にはそれぞれの RMS 粗さを示す。ミクロスケール表面

Fig. 10 Surface roughness of Sample N 1.

粗さは、表7の画素サイズ 0.1×0.1 mmにおける塗工量分布と類似した傾向を示すことが認められる。一方、マクロスケール表面粗さは原紙の質量分布と良好な相関のあることが認められた。

以上の結果から、1 mm以下の小さなスケールでは原紙の表面粗さと塗工量分布が密接な関係にあるが、数mm以上の大きなスケールでは原紙の質量分布が表面の凹凸に影響を及ぼし、さらに塗工量分布を支配することが推測される。

4.4 原紙のワイヤーマークの影響

原紙のワイヤーマークは、質量あるいは密度差によって生じるパターンと考えられ、塗工量分布に影響を及ぼしていることが予想される。MacGregorら¹²⁾は軽量塗工紙のオフセット印刷濃度の不均一性とワイヤーマークの関係を顕微鏡と画像解析装置を利用して検討し、印刷の不均一性パターンと原紙ワイヤーマークの間に良好な相関の認められることを明らかにしている。その理由として、彼らは原紙のワイヤーマークに起因する部分的な塗工層厚さ（塗工量）の変動が印刷の不均一性を引き起こすことをあげているが、実証はしていない。本研究では、Praastら²²⁾の方法に類似した2次元フーリエ変換に基づくワイヤーマーク抽出法²³⁾により原紙中のワイヤーマークと塗工量分布の関係を検討した。

図11には、試料N1の原紙の質量分布像および塗工量分布像の2次元フーリエパワースペクトルと上記の方法により抽出したワイヤーマーク像を示す。パワースペクトルでは、低周波成分がスペクトルの中心

付近に表示され、高周波成分が周辺部に表示される。パワースペクトル中の白い点はワイヤーマークに相当する周期性成分であり、これらを抽出して2次元フーリエ逆変換を行うとワイヤーマーク像が得られる。図11から、原紙だけでなく塗工層においてもワイヤーマークパターンの存在することが明らかである。これは原紙のワイヤーマーク部分で質量あるいは表面粗さが変動しており、その結果として塗工量変動が引き起こされているものと考えられる。

図11の塗工量分布のフーリエパワースペクトルには中心付近に水平の黒い部分が存在する。パワースペクトルにおける水平方向は、試料のマシン方向に対応するため、この部分はとくにマシン方向の低周波成分が少ないこと、すなわち塗工量分布の長波長成分のうちマシン方向の成分がほとんど存在しないことを示している。

低速ブレード塗工の場合、ブレード先端はマシン方向の小さなスケールの原紙表面粗さにはほとんど追従しないが、大きなスケールの表面粗さにはほぼ正確に追従して動く。一方、幅方向ではブレードが幅方向に長さを持つため、ブレード先端は大きなスケールの表面粗さに対しても追従しない。このため、マシン方向と幅方向で大きなスケールの塗工量変動に差を生じる。ただし、高速ブレード塗工の場合はブレードが高速で塗液をかき落とすため状況は若干異なるものと思われる。今後、塗工速度や塗工程における他の因子の影響についても検討する必要があると思われる。

Fig. 11 Two-dimensional Fourier power spectra and wire mark in the basestock and the coating layer of Sample N1.

5. 結 論

エレクトログラフ法は高解像度で質量分布を測定する場合に適した方法である。本研究では、エレクトログラフ法と触針式表面粗さ測定法により、原紙の質量分布と表面粗さが塗工量分布に及ぼす影響について検討した。その結果、1 mm 以下の小さなスケールでは原紙の表面粗さが塗工量分布を支配するが、それ以上の大きなスケールでは原紙の質量分布が表面の凹凸に影響を及ぼし、結果的に塗工量分布を支配することが示唆された。また、原紙のパルプ配合やワイヤーマークも塗工量分布に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

本研究で用いた方法では、塗工前後の同一位置について試料のエレクトログラフを撮影する必要があるため、シート状の試料にしか適用できない。今後、生産機やパイロットコーターで塗工する連続的な試料の塗工量分布を測定する方法についても開発する必要があると考える。

謝 辞

本研究を行うにあたり、有意義な御教示をいただいたインターナショナルペーパー社の Dr. M. Bruce Lyne と Dr. Henry J. Kent に深く感謝致します。また、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 に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) Lepoutre, P. : Tappi J., 59 (12), 70 (1976)
- 2) Lepoutre, P. : "The Structure of Paper Coatings : An Update", Tappi Press, Atlanta, 1988
- 3) Eklund, D. A. and Palsanen, J. A. : Tappi J., 53 (10), 1925 (1970)
- 4) Lepoutre, P. : Tappi J., 61 (5), 51 (1978)
- 5) Engström, G. and Rigdahl, M. : Tappi J., 69 (1), 86 (1986)
- 6) Bergh, N. O., Thomlin, W. H., and Kogler, W. L. : Wochenblatt für Papierfabrikation, 101 (6), 171 (1973)
- 7) Quackenbush, D. W. : Tappi J., 62 (12), 75 (1979)
- 8) Quackenbush, D. W. : "1984 Tappi Coating Conference Proceedings", Tappi Press, Atlanta, 1984, p. 105
- 9) Heiser, E. J. and Baker, H. M. : Tappi J., 51 (11), 528 (1968)
- 10) Nishioka, T., et al. : "1986 Tappi Coating Conference Proceedings", Tappi Press, Atlanta, 1986, p. 55
- 11) Kent, H. J., et al. : "1986 Tappi Coating Conference Proceedings", Tappi Press, Atlanta, 1986, p. 103
- 12) MacGregor, M. A. and Connors, T. E. : Tappi J., 70 (9), 95 (1987)
- 13) Gane, P. A. C. : Paper Technology, 30 (4), 34 (1989)
- 14) Gane, P. A. C. and Hooper, J. J. : "Fundamentals of Papermaking, Vol. 2", Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1989, p. 871
- 15) Engström, G., Johansson, P. -Å., and Rigdahl, M. : "Fundamentals of Papermaking, Vol. 2", Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1989, p. 921
- 16) Tomimasu, H., Luner, P., and Hanna, R. B. : "Fundamentals of Papermaking, Vol. 1", Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1989, p. 159
- 17) 富増 弘, Luner, P. : 紙パ技協誌, 44 (9), 59 (1990)
- 18) Birkhoff, R. D. : "Encyclopedia of Physics", Springer-Verlag, Berlin, 1958, p. 53
- 19) Bielajew, A. F. and Rogers, D. W. O. : "National Research Council of Canada, Division of Physics, Report Vol. 42", Ottawa, 1986
- 20) 湯原 隆, 蓮池牧雄, 村上浩二 : 繊維学会誌, 42 (5), T-279 (1986)
- 21) Gervason, G., et al. : Cellulose Chemistry and Technology, 20, 483 (1986)
- 22) Praast, H. and Göttching, L. : Das Papier, 41 (3), 105 (1987)
- 23) 富増 弘, Luner, P. : 紙パ技協誌, 45 (3), 55 (1991)

(受理 : '91.4.15)