研 究 報 文

紙層構造パラメータによるパルプシート光学的性質の評価
厚壁繊維シートの光学的性質*

京都大学農学部 蓮 池 牧 雄, 村 上 浩 二

Geometrical Parameters Characterizing The Optical
Properties and Layered Structure of Pulp Sheet
Evaluation of Thick-walled Element Sheets

Makio Hasuike and Koji Murakami

Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japan

Interrelationships between optical properties and layered structure of the sheets from beaten thick-walled (TK) elements and from mixture of thin-walled short (TNS) elements and lightly beaten TK elements were discussed quantitatively by applying the layered model theory developed by Scallan and Borch.

The “apparent” layer thickness, t' , determined from the experimental values of reflectance and basis weight by using Eq. [3A] was a good structural parameter which relates optical properties to layered structure of the sheets especially from highly bleached pulp elements. Since the layered structure of real sheet is different from the parallel layered model illustrated by Scallan and Borch, it is pointed out that the “apparent” layer thickness, t' , is practically affected by two geometrical parameters of the sheet, the layer thickness in z-direction, t_f , and anisotropy parameter, ε , and expressed as $t' = t_f / \varepsilon$. The t_f estimated by analyzing the cross sections of the sheets and t' from optical data for the thick-walled element sheets are tabulated in Table 3.

Peculiar characteristics in optical properties of the sample sheets were found. The opacity and specific scattering coefficient of the sheets from beaten TK elements increase with the progress in beating and those of the sheets from the mixture of TNS elements and TK elements also increase with the increase in the content of the TNS elements (Table 2 and Fig. 4).

The increase in specific scattering coefficient indicates that optically effective surface area of the sheet increases. It was reflected on the increase in the number of optically effective layers, n_o , and on the decrease in “apparent” layer thickness, t' , of the sheets (Table 3).

These structural changes in the thick-walled element sheets estimated from the optical data could be supported by the layered structure observed on the cross sections of the sheets (Fig. 3). In the case of beaten TK element sheets, thin filmy layers were found among the element-to-element spaces due to the separation of TK elements during beating process. In the sheets from mixture of TNS elements and TK elements, the TNS elements were located in the sheets like a bridge between TK elements.

Keywords: Thick-walled elements • Optical properties • Geometrical structure • Beating • Blending

* 本研究は第51回紙パルプ研究発表会（1984年6月，東京）において発表した。

1. 緒 言

Scallan and Borch^{1)~3)} によって考案された「層状理論」をパルプシート・紙の光学的性質の解析に用いると、紙層を構成する繊維の光学特性（繊維と空気界面の反射係数 r と繊維層の吸収係数 a ）、シートの構造因子（光学的有効層数 n_0 と層内の光路長 t_0 ）及びシートの光学的性質（反射率 R_0 、ブライトネス R_∞ 、印刷不透明度 R_0/R_∞ 、透過率 T_0 ）の三者を定量的に関係づけることができる。また、これら繊維の光学特性やシート構造因子と従来より用いられてきた Kubelka-Munk 理論によって得られる比散乱係数 S 、比吸収係数 K との対応関係は土田⁴⁾ によって明らかにされ、光学的性質とシート構造の関係について従来より詳細な検討が可能になった。

このような状況のもとで筆者ら^{5), 6)} は、実在のパルプシート・紙に「層状理論」を適用して、パルプ構成要素及びシート構造から光学的性質を、あるいは逆に光学的性質からシート構造を研究する上で重要な光学的有効層数とシートの幾何学的構造因子との関連性について検討し、パルプシートの拡散光に対して有効な層数にはシート厚さ方向の繊維層数と繊維層のシート面への配向度が相乗的に関与することを明らかにした。更に、シートの坪量・反射率の実測値と Scallan らによって提示された一連の理論式を用いて推定した“光学的単層厚さとその数”が叩解に伴うシート構造の変化を的確に表わしていることをアカマツ、マカンパ、竹パルプの叩解程度の異なる一連のシートを用いて明らかにした。その中で、細胞壁の厚い竹パルプでは、アカマツ、マカンパのパルプと異なり、叩解の進行によってシートの印刷不透明度、比散乱係数の向上がみられ、光学的単層厚さが減少すること、更に竹パルプの光学的性質の特異的挙動は叩解による皮膜状の細胞壁薄片の生成によることを明らかにした。

本研究では、広葉樹厚壁繊維パルプの叩解シート及びこのパルプに亜麻木質部の薄壁短繊維パルプを混入したシートを供試して、はじめに「層状理論」を用いて光学的データから推定される構造パラメータとシート断面の幾何学的構造因子との関係について、つぎに竹パルプでみられるような厚壁繊維パルプシートの光学的性質の特異的挙動についてシート層状構造と関連づけて検討する。

2. 試料及び実験方法

2.1 供試パルプ及びシートの調製

厚壁繊維パルプとしてフィリピン産のバゴタンビス

材 (*Syzygium leytense* Merr) のクラフトパルプから道管要素を除去した木繊維パルプ、薄壁の短繊維パルプとして亜麻 (*Linum usitatissimum* L.) の中性亜硫酸パルプ^{7), 8)} から分離した木質部パルプを選び、それぞれを Weise 法⁹⁾ により 2 時間脱リグニン処理して供試した。TAPPI 標準試験法 (T-234 su 67) に準拠して作成したブレパラートを用いて、供試パルプ繊維の長さ、幅及び粗度の測定^{10), 11)} を行った結果、それぞれの平均値は厚壁繊維では 1.46 mm, 16.5 μm , 19.8 mg/100 m, 薄壁短繊維では 0.27 mm, 18.9 μm , 6.4 mg/100 m であった。両パルプ繊維内腔コラップス時の断面模式図を図 1 に示す。なお、ランダムシート断面における繊維外周部の配向度 ω と配向度パラメータ ε ⁵⁾ は厚壁繊維では 0.342, 1.37, 薄壁短繊維では 0.819, 1.10 程度の値が推定される。

Fig. 1 Cross-sectional shape of the lumen-collapsed elements used in the experiments.

Note; The thickness was estimated from the coarseness and width of the elements.

つぎに、厚壁繊維パルプを PFI ミルにより叩解（絶乾パルプ 16 g、濃度 10%、クリアランス 0.2 mm）し、叩解程度の異なる一連の手すきシートを調製する一方、軽度叩解（PFI ミル回転数 5,000）した厚壁繊維パルプに薄壁短繊維パルプを重量分率で 10, 20, 40% それぞれ混入した手すきシートを調製した。なお、シート調製時の湿圧付与と乾燥は潤湿シート両面を汙紙ではさんで行った。JIS に準拠して行った供試シート物理試験結果を図 2 に示す。

2.2 シート断面形態の観察及び繊維層厚さの推定

供試シート断面切片の顕微鏡拡大写真をもとに繊維層厚さの推定を以下の手順で行った。

前報⁵⁾ の手順に従って、供試シート 4 枚を重ね合せて包埋、厚さ 1 μm のシート断面切片を作成し、切片の変形・破損をさけるため、無染色のままカナダバルサムで封入した。

断面切片の観察には、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡（オリンパス光学工業社製）¹²⁾ を用い切片拡大像の撮影を行った。微分干渉顕微鏡は、試料の位相差変化を干渉色や明暗コントラストとして検出できるため、

Fig. 2 Effects of beating and blending of thin-walled short elements on the physical properties of the thick-walled element sheets (W_{tns} : Content of thin-walled short elements).

無染色試料の観察が可能であり、更に位相差顕微鏡観察時に生ずる干渉縞がなく、解像力の点で位相差法よりすぐれていることが特徴である。なお、パルプ繊維

や断面切片試料の検鏡法についての詳細は別に報告¹³する。

供試シート断面に含まれる薄層形状要素の厚さの

Table 1 Effects of blending of thin-walled short (TNS) elements with thick-walled (TK) elements on the numerical data of the sheet (60 g/m^2 in basis weight) estimated from their dimensional quantities.

Content of TNS elements (wt. %)	TK element			TNS element		
	N_e ^{a)}	N_p ^{b)}	N_c ^{c)}	N_e	N_p	N_c
0	20.8	5.10	103	—	—	—
10	18.8	4.51	92.8	35.7	1.80	32.5
20	16.7	4.01	82.4	70.6	3.59	65.1
40	12.5	3.01	61.7	141	7.19	130
100	—	—	—	353	18.0	325

^{a)} N_e : number of elements in unit area, $\times 10 \text{ mm}^{-2}$, ^{b)} N_p : mean number of elements at a point in the sheet, ^{c)} N_c : mean number of elements intersected by sectioning of the sheet, mm^{-1} .

正確な計測が極めて困難であるため、断面の 500 倍拡大写真に前報⁵⁾と同様、実長 $8\mu\text{m}$ 間隔となるように平行線パターンをはりつけ、これらの線と繊維部分の交差数の計測によって繊維層数を計測した。繊維層厚さ t_f は繊維層数 n_f と坪量 W を用いて次式によって推定した。

$$t_f = VW/n_f \quad [1]$$

ただし、 V はパルプ繊維比容積で、ここでは Scallan ら¹⁾と同様セルロースのそれに相当する値 $0.667\text{ cm}^3/\text{g}$ を用いた。

なお、坪量 60 g/m^2 の薄壁短繊維混入シートについて厚壁及び薄壁短繊維の形態量から推定した断面におけるそれぞれの繊維の数 N_o を、シート単位面積あたりの数 N_e 、シート上の点を被覆する数の平均（平均重量繊維数） N_p と共に表 1 に示す。（推定方法については前報¹⁴⁾を参照されたい。）ここで N_p はシートに垂直に入射した光が裏面に到達するとき通過する平均繊維数に相当する。厚壁繊維に対する薄壁短繊維の N_o の比率がそれら繊維の N_p の比率と同程度であり、シート断面形態から薄壁短繊維混入シートに対する「層状理論」の構造因子の推定が有効であることを示唆している。

2.3 シート反射率の測定⁵⁾

測定には、直径 200 mm 積分球反射測定装置を装着したダブルモノクロメータ自記分光光度計 UV-365（島津製作所製）を用い、 7° 平行光照明/拡散光受光方式の光学系によって波長 400–700 nm の分光反射率を測定した。試料面における入射光束の大きさは $24\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ とし、反射率の校正には標準白色物質（DIN 5033）の硫酸バリウム（メルク社製）を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 厚壁繊維シート紙層構造パラメータの推定

3.1.1 光学的単層厚さの推定

筆者ら⁵⁾は光の反射・透過に関与するシートの幾何学的構造因子を考慮して以下の 2 点を明らかにした。すなわち、拡散光に有効な層数 n_o が繊維層数 n_f と繊維層のシート面に対する配向度パラメータ ε の積で与えられること、更に有効層数の分布にポアソン分布を仮定して理論的反射率の計算を行ったとき、反射率・透過率の実測値 R_o 及び T_o に相当する理論値 R_{n_o} 及び T_{n_o} を与える繊維層の反射係数 r が 0.1 に極めて近い値であることを示した。この値はセルロースの屈折率 1.53–1.59 の理論的反射係数の平均値に相当する。したがって、シート中の光学的有効層の数は次式で与え

られるものとする。

$$n_o = n_f \cdot \varepsilon \quad [2]$$

ここで繊維層の吸収係数 a を $a = 0$ と仮定すると、有効層数 n_o からなるシートの反射率 R_{n_o} の逆数は [8] 式で表わされ¹⁾、更に [1] 及び [2] 式の関係を用いると [3A] 式が導びかれる。

$$\begin{aligned} 1/R_{n_o} &= 1 + [(1-r)/2r](1/n_o) \quad [3] \\ &= 1 + [(1-r)/2r](t_f/\varepsilon)(1/VW) \quad [3A] \end{aligned}$$

また、同じ仮定のもとで Kubelka-Munk 理論の比散乱係数 S は [4] 式で表わされ⁴⁾、更に [4A] 式が導びかれる。

$$\begin{aligned} S &= [2r/(1-r)](n_o/W) \quad [4] \\ &= [2r/(1-r)](\varepsilon/t_f)V \quad [4A] \end{aligned}$$

上記一連の式中の反射係数 r を $r = 0.1$ 、繊維層の比容積 V を $V = 0.667\text{ cm}^3/\text{g}$ とすると、シートの坪量と反射率は実測可能であるから、[3A] 式によって t_f/ε が、更に [4A] 式によって比散乱係数 S が推定できる。ここで t_f/ε の値は 2 つの幾何学的構造因子、繊維層厚さ t_f 及び配向度パラメータ ε に支配される。ただし、Scallan らの層状モデル¹⁾のように ε が $\varepsilon \approx 1$ であるようなシートでは t_f/ε が単層の厚さに相当する量であるので、ここでは反射率実測値から得られる t_f/ε を“光学的単層厚さ”と呼ぶことにする。

なお、供試シート中最もブライトネスの低いシート ($R_{\infty} = 0.861$) の繊維層の透過係数 $f = 0.99751$ (表 2) 及び $f = 1$ (すなわち $a = 0$) を用いて得られた理論的反射率の差は層数 10 で 0.013、層数 20 で 0.028 程度であること、またアカマツ、マカンバ、竹さらしパルプの叩解程度の異なる一連のシートの反射率と坪量の逆数プロットがいずれも坪量 90 g/m^2 以下ではほぼ直線上にあること⁶⁾から、坪量 60 g/m^2 程度のさらしパルプシートに対して $a = 0$ の仮定が許容され则认为られる。

3.1.2 供試シート光学的単層厚さと幾何学的構造因子との関係

厚壁繊維叩解シート及び薄壁短繊維混入シート断面のノマルスキー型微分干渉顕微鏡写真を図 3 A・B に示す。

厚壁繊維シートでは、その厚さ方向において繊維が相互に密着した構造を形成しえず、極めて粗な層構造で繊維層の配向度もかなり低く、叩解による紙層の圧密化・配向度の改善の程度も小さい。しかし叩解した厚壁繊維シート中には繊維と繊維の間に介在する極めて薄い皮膜状の形態要素が観察され、その数は叩解の

Fig. 3A Layered structure of the sheets prepared from beaten thick-walled elements (PFI mill beating: a) 10000 rev., b) 15000 rev. and c) 20000 rev.).

Fig. 3B Layered structure of the sheets prepared from the mixture of lightly beaten thick-walled elements and thin-walled short elements (Content of thin-walled short elements: a) 0%, b) 10%, c) 20% and d) 40%).

進行に伴って増加する傾向がみられる (図 3 A)。

一方, 厚壁繊維パルプに薄壁短繊維パルプを混入したシートの構造は, 厚壁繊維叩解シートの構造の特徴によく類似しており (図 3 B), 混入率を調整することによって厚壁繊維叩解シートの紙層構造更には光学の性質に類似のシートを得ることが期待できる。また, これらのシートでは紙層中の薄壁形態要素の識別が容易であり, 本実験では薄壁短繊維パルプ混入シートについて繊維層の厚さを求めた。

つぎに供試シート光学の性質の実測値を表 2 に示す。表中の透過係数 f はブライトネス R_{∞} と反射係数 $r=0.1$ を用いて計算した値, 比散乱係数 S^* は坪量と反射率の実測値を用いて [3A] 及び [4A] 式より計算した値である。供試シートのブライトネス・透過係数の低下に伴い散乱係数 S^* は Kubelka-Munk 式より得られた S 値より若干低くなる傾向がみられるが, 両者

の間に良好な対応関係がみられる。なお, 供試シートの光学の性質の叩解及び薄壁短繊維パルプ混入の効果については 3.2 項で述べる。

供試シートの構造パラメータを表 3 に示す。表中の t_f と n_f はシート断面の解析によって得られた繊維層の厚さとその数, t' は表 2 のデータから得られた光学的单層厚さ, n_o' は“みかけ”の光学的有效層数 (層数分布を持たないシートの光学的有效層数) である。なお, n_o' は t' の値を [1] 式に代入して推定した値である。 n_o は光学的有效層数を示し, 反射率実測値 R_0 に相当する理論値 R_{n_o} を与える層数である。計算には反射係数 $r=0.1$ と表 2 の透過係数 f の値を用い, 層数の分布にはポアソン分布を仮定した ($R_{n_o} = \sum_{k=0}^{\infty} R_k \cdot \exp(-n_o) n_o^k / k!$)⁵⁾。

供試シートの光学的单層厚さ t' は, 叩解の進行及び薄壁短繊維パルプ混入率の増加に伴って共に減少する

Table 2 Optical characteristics of the sheets at 557 nm in wave length.

Content of TNS elements (wt. %)	PFI mill (rev.)	Basis weight (g/m ²)	R_{∞} ^{a)}	f ^{b)}	R_0 ^{c)}	S ^{d)}	S^* ^{e)}
0	5000	55.2	0.898	0.99871	0.580	254	251
0	10000	60.4	0.899	0.99874	0.617	272	264
0	20000	67.1	0.891	0.99852	0.667	308	296
10	5000	56.6	0.889	0.99846	0.633	313	302
20	5000	57.1	0.867	0.99774	0.640	324	308
40	5000	57.9	0.861	0.99751	0.648	334	315

^{a)} R_{∞} : reflectance for infinite piles of the sheets, ^{b)} f : transmissivity of the optically effective layer of the sheet estimated from R_{∞} value, ^{c)} R_0 : reflectance for a single sheet, ^{d)} S : specific scattering coefficient calculated by Kubelka-Munk equation, cm²/g, ^{e)} S^* : specific scattering coefficient calculated by using Eq. [4A], cm²/g.

Table 3 Morphological parameters estimated from geometrical and optical data of the sheets.

Content of TNS elements (wt. %)	PFI mill (rev.)	Geometrical		Optical		n_o ^{e)}	n_o/n_f
		t_f ^{a)}	n_f ^{b)}	t' ^{c)}	n_o' ^{d)}		
0	5000	7.1	5.2	5.9	6.2	7.0	1.35
0	10000	—	—	5.6	7.2	8.0	—
0	20000	—	—	5.0	8.9	10.0	—
10	5000	6.0	6.5	4.9	7.7	8.7	1.34
20	5000	5.2	7.3	4.8	7.9	9.1	1.25
40	5000	—	—	4.7	8.2	9.4	—

^{a)} t_f : mean layer thickness calculated by substituting n_f into Eq. [1], μm , ^{b)} n_f : mean number of layers estimated from cross section of the sheet, ^{c)} t' : “apparent” layer thickness calculated by using Eq. [3A], μm , ^{d)} n_o' : “apparent” number of optically effective layers by substituting t' into Eq. [1], ^{e)} n_o : mean number of optically effective layers estimated by the mean number of layers necessary for the calculation of reflectance (R_{n_o}) which is equivalent to measured one (R_0).

傾向がみられる。またシートの断面について計測した繊維層厚さ t_f も薄壁短繊維パルプ混入率の増加により減少するが、これら繊維層厚さは対応する光学的単層厚さよりかなり大きい。

つぎに、光学的有効層数 n_o はそれぞれ叩解の進行・混入率の増加に伴って増加するが、その値は対応する“みかけ”の有効層数 n_o' 、繊維層数 n_f より大きい。ただし、光学的有効層数はいずれも“みかけ”の有効層数のほぼ 1.1 倍程度となるが、これは [3A] 式が層数に分布を有しないシート反射率に関する式であり、反射率に対する層数分布の寄与が考慮されていないことに起因する³⁾。

繊維層数に対する光学的有効層数の比 n_o/n_f は、[2] 式から明らかのように配向度パラメータ ϵ に相当する値を与えるものと考えられるが、混入率 0% の値 1.35 は前述のように厚壁繊維パルプ形態の評価によって推定されたコラプス繊維断面の配向度パラメ

ータの値 1.37 にかなり近い値であり、混入率の増加に伴って小さい値となる傾向がみられる。

以上の結果から、光学的単層厚さを繊維層厚さを配向度パラメータで除した量に相当することが明らかで、光学的単層厚さを光学的有効層数の推定あるいは多くの市販パルプシートのように配向度パラメータが 1 に近いシートの繊維層の厚さ及び層数の評価に用いられると考えられる。

3.2 厚壁繊維シートの紙層構造と光学的性質について

前述のように、厚壁繊維シートでは所定坪量における平均重量繊維数が少ないこと (表 1)、更に繊維相互の重なり度合いが低く、嵩高いしかも配向度の低い層構造を有すること (図 3) が特徴である。このため、叩解の際に繊維外壁部から剝離した薄片、あるいは混入した薄壁短繊維が繊維間空間に薄層状の形態を保持した状態で介在するものと考えられる。

Fig. 4 Effects of beating and blending of thin-walled short elements on the optical properties of the thick-walled element sheets (W_{tns} : Content of thin-walled short elements).

供試シートのブライトネス R_{∞} , 印刷不透明度 R_0/R_{∞} , 比散乱係数 S をそれぞれ PFI ミル回転数及び薄壁短繊維混入率に対してプロットした結果を図 4 に示すが, 叩解の進行及び混入率の増加によって印刷不透明度, 比散乱係数は増加する。このような光学的性質の変化は, 叩解の進行及び混入率の増加に伴って紙層中の薄層状態要素が増加するため, 光学的単層厚さや繊維層厚さが減少し (表 3), シートの内部表面積が増加することによるもので, 上記のような厚壁繊維シートの特徴的な紙層構造が関与している。ただし, 叩解初期に繊維内腔のコラップスによると考えられる印刷不透明度, 比散乱係数の低下がみられるが, その程度はアカマツ, マカンパ両パルプに比べ著しく小さく, また繊維内腔の極めて小さい竹パルプにおいては叩解初期における両光学特性値の明確な低下は認められない⁶⁾。このように紙層形成時の繊維内腔のコラップスによるシート内部表面積の減少が軽微であることも厚壁繊維シートの構造的特徴の一つである。

なお, ブライトネスは叩解の進行に伴い微増するにとどまる一方, 混入率の増加に伴って減少する傾向がみられるが, これは混入した亜麻木質部パルプ繊維の透過係数 f の値が厚壁繊維のそれより低いことによる。

つぎに, 厚壁繊維パルプの叩解及び薄壁短繊維混入の効果について比較すると, 印刷不透明度, 比散乱係数ともに混入率 10~20% 程度で 20,000 回転叩解シートに匹敵する値が得られる。厚壁繊維パルプの叩解による多量の細胞壁薄片の生成のためには過度の叩解が要求されることを考慮すると, 薄壁短繊維パルプを混入することが厚壁繊維シートの光学的性質の向上に極めて有効であると考えられる。ここで混入した亜麻木質部パルプ繊維はその内腔がほとんどコラップスした状態で紙層中に存在するが, 繊維間結合部以外の部位がコラップスしないような薄壁繊維パルプを選択, 適量混入することによって, 厚壁繊維パルプから更に優れた光学特性を有するシートの製造が可能になるものと考えられる。なお, 供試シートの強度値は図 2 を参照されたい。

4. 結 論

広葉樹厚壁繊維パルプ叩解シート及び厚壁繊維パルプに亜麻木質部の薄壁短繊維パルプを混入したシートを用いて, 厚壁繊維シートの光学的性質とシート幾何学的構造の対応関係を検討した。

さらしパルプシートのように繊維層の吸収係数が小さいシートでは, 「層状理論」を用いると, 坪量及び反射率の実測値から光学的単層厚さが推定でき, この

光学的単層厚さがシート断面における厚さ方向の繊維層数を配向度パラメータで除した量に相当すること, 更に光学的単層厚さの推定値から比散乱係数も良好な精度で推定できることが示された。

厚壁繊維パルプでは叩解の進行に伴って, シートの印刷不透明度・比散乱係数が増加すると共に, 光学的単層厚さの減少が認められ, また薄壁短繊維パルプの増加に伴う光学的性質の変化についても叩解の場合と同様の傾向が認められた。

更にシート断面の観察によって, 厚壁繊維パルプの叩解の進行及び薄壁短繊維パルプ混入率の増加に伴う光学的単層厚さの減少は, 厚壁繊維シートでは繊維相互の重なり度合の低い層構造を有するため, 叩解の際繊維外壁部から剥離した薄片あるいは混入した薄壁短繊維が繊維間空間に薄層状の形態で介在することによるものと推定された。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 亜麻中性亜硫酸パルプを提供下さいました三島製紙株式会社研究所原啓志氏, 供試シート断面切片の作製に御協力いただきました京都大学農学部藤田稔氏, 供試シートの調製及び各種の測定に御協力いただきました小木曾克己氏に深謝致します。なお, 本研究の一部に昭和 58 年度文部省科学研究費補助金 (一般 C : 課題番号 58560168) をあてた。

引用文献

- 1) A. M. Scallan and J. Borch : Tappi, 55, 583 (1972)
- 2) A. M. Scallan and J. Borch : Tappi, 57, 143 (1974)
- 3) J. Borch and A. M. Scallan : Tappi, 59, 102 (1976)
- 4) 土田幸造 : 紙パ技協誌, 33, 260 (1979)
- 5) 蓮池牧雄, 村上浩二 : 木材誌, 30, 315 (1984)
- 6) N. N. Wai, M. Hasuie and K. Murakami : Mokuzai Gakkaishi 30, 1018 (1984)
- 7) 原 啓志 : 紙パ技協誌, 30, 548 (1976)
- 8) 原 啓志, ラムチバックチュエット : 紙パ技協誌, 32, 599 (1978)
- 9) B. L. Browning : "Methods of Wood Chemistry" Vol. 2 Interscience Publishers, New York, p. 395 (1967)
- 10) 蓮池牧雄, 上坂 鉄, 村上浩二, 今村力造 : 木材誌, 28, 230 (1982)
- 11) 蓮池牧雄, 西島 潔, 村上浩二 : 木材誌, 28, 237 (1982)
- 12) R. D. Allen, G. B. David and G. Nomarski : Z. wiss. Mikr., 69, 193 (1969)
- 13) 蓮池牧雄, 河崎尚志, 村上浩二 : 紙パ技協誌投稿予定
- 14) 蓮池牧雄, 村上浩二 : 木材誌, 28, 548 (1982)
(受理 : 59. 8. 8)