製紙物性の研究動向

東京大学農学部 門 屋 卓

Recent Progress on the Study of Papermaking Fibres

Takashi Kadoya

Professor of Pulp and Paper Science, Department of Forest Products, The University of Tokyo.

1. 緒 言

パルプ及び紙を基礎的な研究として扱う場合、そのアプローチの方法は大きく分けると化学的観点に基づくものと物理的観点から考察するものになると考えられる。前者はいわゆる木材化学という用語で統一され、例えばパルプの蒸解機構の研究、リグニンの基礎とその応用研究あるいはパルプ工場排水などの環境科学的研究などが対象としてあげられる。一方、例えばパルプの叩解の機構とその評価方法、紙層形成の理論、出来上った紙の物理的な諸性質などを研究の対象とする分野は木材化学のような統一用語がないままに現在に至っている。

「コンソリデーション」という用語は1966年ケンブリッジで開かれた紙の基礎的研究の国際シンポジウムにおいて Dr. H. F. Rance によって提唱され¹⁾て以来世界的に広く使われるようになってきたがまだ十分浸透しているとは言えない。コンソリデーションの定義としては、繊維と水とが共存している状態から次第に緻密化が進みウェブを形成してゆく過程を基礎的にとらえ解析してゆく手法を意味し、多分に物理的アプローチの色彩を持っている。

わが国においては現在このコンソリデーションという言葉の内容を十分に表現できる適切な用語は見当らない。ここでは一応「製紙物性」という命称を与えて昭和41年 (Vol. 20, 1966年) から昭和51年 (Vol. 30, 1976年) に本誌に発表された研究報告を中心として、該当する論文をとりあげ内外の研究動向も加えて紹介することとした。

2. パルプ単繊維の物性

紙の強度を支配する因子はそれを構成している単繊維と繊維間結合強度と結合数によることは以前から知られているが、Van den Akker による紙の引張り破断面を観察した報告²⁾ 以来単繊維の強度の重要性が認

識され多くの研究者によって測定が行なわれている。わが国では臼田らによってパルプ単繊維の強度は原木、パルプ収率、春材、秋材叩解度、蒸解条件の相違などで数 g から数 10 g に変動する結果が得られている³⁾。

最近、Page らは単繊維の物性について精力的な研究を続けており、彼らは1本のパルプ繊維をインストロンで5,000倍に拡大した荷重-伸び曲線を求めると同時に伸長の過程を偏光顕微鏡下で観察し、単繊維の強さにはフィブリル傾角が重要であり、また繊維内のクラックの存在が大きく影響することを主張している⁴⁾。

単繊維の強さを測定する他の手段としてゼロスパンテストは測定法が簡易なためにしばしば引用されているが、最近試料のつかみ間隔を0~2.0 mm に段階的に変えて測定した裂断長との関係式から繊維強度指数、繊維長指数、結合強度指数などを算出する試みが報告され⁵⁾ 興味を持たれる。

湿潤したパルプ繊維が乾燥してその断面が収縮してゆく過程を追跡した Tydeman らの報告⁶⁾ はいわゆるミクロコンプレッション現象を解明する上に貴重な業績であり、振り振動振子を用いた単繊維の対数減衰率の湿度変化依存性はシートのクリープ破壊と湿度変化依存性を解明するための貴重な知見を与えている⁷⁾。

3. パルプ分散液の性質

繊維と水とが分散している状態の系の研究はパルプスラリーの管内輸送、抄紙機アプローチフローの分散性の解析、フロキュレーションの解明、パルプ繊維の界面化学などの問題が関連し重要である。

これらについてはかつて Mason らが研究の先駆者として基本的大系⁸⁾を作ったが、わが国においてはこの方面の研究は少ない。石黒は抄紙機ストックインレットのディストリビュータについて単管の原料流の解析を数値計算によって行ない実用化への適応性を考察している⁹⁾。界面化学の問題に関しては流動電流測定

装置を試作しパルプサスペンションのゼータ電位の測定を尾鍋らが行なっている¹⁰⁾。パルプ原料中の微細繊維やでん料などが紙層中に留まる問題は、抄紙排水の流出物の制御、原料コストの節減、リテンション剤の有効利用、フロキュレーションの制御、紙質への影響などに関連する。このような一種のコロイド分散系の研究には界面特性が重要な因子となっており、Wet End Chemistry という分野が出来上りつつあり、ゼータ電位の各種の測定方法が提案¹¹⁾されている。また、1977年オックスフォードで開催される紙の基礎的研究のシンポジウムにおいてもこの方面の研究成果が多数発表される予定であり、今後の重要な課題の1つであろう。

4. 叩 解

叩解の原理は Ingmanson と Thode が繊維の内部フィブリル化と外部フィブリル化の状態の重要性を提唱¹²⁾し、特に内部フィブリル化によって繊維は外力に対し変形しやすくなり横方向の変形性 (Lateral Conformability) の進行が紙の特性に大きく寄与していることを Higgins らは強調¹³⁾し、新たな叩解方式についての基礎的な検討が行なわれてきた¹⁴⁾。岩崎らは超音波処理による叩解方法を検討し超音波の周波数依存性やヘミセルロースの溶出の影響を調べている¹⁵⁾。村田らは PFI ミル及び実機を用いて低濃度叩解の相違を繊維形態面、シートの地合形成面、シート物性面で比較検討を行なった¹⁶⁾¹⁷⁾。このような叩解方式の検討は最近の南方材の利用が盛んになって来るに従って、重要な課題として1973年のBPBMAのシンポジウム¹⁸⁾や1975年のTappi Physics Conference¹⁹⁾において発表と討論が行なわれている。

またこのような叩解の真の意味を追究する叩解度の評価については臼田らによる透過法、保水値、繊維長などの測定法の確立と検討が行なわれ²⁰⁾、またCSFの測定方法を水力学的に解析して測定値の意味を明らかにした土田らの報告²¹⁾が知られている。

5. 抄紙物性

抄紙機工程中での脱水、プレス、乾燥などの挙動を基礎的にとらえ解明するとともに抄紙機構の理論大系をつくり上げて行こうとする動きは、わが国においては従来あまり見受けられなかったが、海外においては多数の報告が知られている²²⁾。最近では流体工学的観点からまとめた H. Meyer の長大な総説²³⁾があり、またツインワイヤ抄紙機の Bunched Tube Headbox の基礎となったサスペンションの分散状態を三角形の

大型プリズムを使って定量的観察をした J. Parker らの実験²⁴⁾、フロックの分解と流体の運動エネルギーの関係を追究した D. Wahren²⁵⁾、B. Norman²⁶⁾ らの理論から、3~5%のパルプ濃度で抄紙する高濃度抄紙法の開発²⁷⁾、あるいは同じくパルプ繊維の均一分散を目的としてパルプサスペンションに多量の気泡を混入した場合の挙動を研究し、Foaming Process を確立した B. Radvan²⁷⁾の報告などがあげられる。

わが国におけるこの分野の研究はようやく最近になって武田らが抄紙機の湿紙乾燥のメカニズムについて実験用パイロットドライヤを試作し実験方法を確立すると共に数式モデルを用いて乾燥の過程を解析し、またベンチレーションやカンバスの影響についても言及している²⁸⁾²⁹⁾。

また、抄紙機ドライバートの解析を行なうための問題点をあげ、考察した結果を高速抄紙機の乾燥に拡張した石黒の報告³⁰⁾³¹⁾もほとんど同時期に行なわれている。

ストックインレットの原料流解析についてはパルプ分散液の項で言及したが、一方長網抄紙機の坪量変動要因を分析するために抄紙システムのシミュレーションを行ない、テストマシンについて実証を行なった村田らの報告³²⁾³³⁾や抄紙機ワイヤパートの脱水について数式モデルを開発しドライラインの位置決定を行なった矢ヶ部、甲斐の研究³⁴⁾も我が国では新しい。

抄紙用具に注目して抄紙物性の面からの研究としては、抄紙機ワイヤパートのワイヤ保持材とワイヤ摩耗との関係を論じるために摩耗測定機を開発し用具素材との関係を検討³⁵⁾したもの、マシンプレス用弾性被覆ロールの発熱の理論を考え抄速とシートのフラッターリングの問題に発展させた研究³⁶⁾、高速スーパーカレンダーの内部発熱について考察した研究³⁷⁾などいずれも石黒による一連の報告が知られている。

海外においてはレーザー光線、赤外望遠温度計、オプチカルファイバーなどを組み合わせてマシンカレンダーの局部的熱膨脹と紙質の関係³⁸⁾、管内輸送におけるパルプフロックの周波数解析³⁹⁾など新しい測定技術による解析法が盛んに行なわれている。

6. 紙の物性 (力学的性質)

紙の物性は極めて広い内容を含んでおり、これを力学的性質とその一般的物性とに分けてまとめた。また、この分類に入らない研究報告に関しては別項をもうけ「その他の研究動向」とした。

紙の用途は社会の様相と相まって、ますます多様化かつ複雑化し、しかも大量に使われるようになってき

た。このような多くの複雑な用途に対応するためには、紙の力学的性質やその他の物性を把握しその本質を解明するとともに、紙の製造条件へ反映させる必要が生じてきた。

紙の力学的性質の研究は1950年前後 Steenberg や Rance が紙の性質を解明する手段としてレオロジカルな考え方を導入し、アカデミックに紙を考える方向づけを行なった。その後1960年代には引張り伸長過程での紙の構造変化が物理的性質に及ぼす影響について研究が指向し、例えば Nordman の引張り変形時の紙の散乱係数の変化を求めた報告⁴⁰⁾などで代表される。

1960年後半からいわゆるマイクロコンプレッションの概念が導入され紙の強度の本質がかなり明らかにされてきた。1970年前後の研究の趨勢は1973年のケンブリッジのシンポジウムなどで見られるように紙の不均一性とそれに起因する物性への影響が対象となっているようであり、わが国でもこれに着目した幾つかの研究が挙げられる。

まず、紙の強度的問題について本誌の過去の報文を展望すると、シート作製条件と力学的性質との関係を取りあげた岩崎らの報告は異方性シートを実験室的に作製する方法を述べ、繊維配向度と引張り強さとの関係の数式化を提示している⁴⁷⁾。岡村はクラット紙の湿紙強度に着目し荷重一変形曲線を求め、さらに乾燥条件の影響について観察している⁴²⁾。紙の加工面への利用が高まるにしたがってその加熱時の性質が問題になる。高塚らはSP、KPの手すきシートについて200℃まで温度を変化させた場合の荷重一変形曲線と応力緩和を求めた⁴³⁾。紙の強度の温度依存性については最近振り振動法を用いて-120~190℃での剛性率、対数減衰率を求めた報告⁴⁴⁾、-25~250℃の油の中でクラフト紙、中しん原紙などの荷重一変形曲線を求めた Salmén らの報告⁴⁵⁾、各種市販の紙について0~200℃の範囲で弾性率と線膨脹係数を調べ、測定値間に関数関係を認めた Ruvo の報告⁴⁶⁾など紙の温度特性への関心が高まりつつある。これらの力学的特性は紙を構成する単繊維と繊維間結合強度に支配されることはすでに述べたが、臼田らは結合強度に着目して、ホロセルロースの影響、節別による繊維長の影響などを光学的比表面積値と結合強度値から求め考察している⁴⁷⁾。

紙に薬液を含浸させたり、グラフトを行ない新たな性質を付与することも最近盛んになってきたが、これらの力学的性質との対応にはまだ残された問題がいくつかある。MMA (メチルメタアクリレート)、EMA (エチル MA)、BMA (ブチル MA) 加工した紙について、含水率、温度と耐折強度の関係⁴⁸⁾、膨潤

度と強度の関係⁴⁹⁾などについて李らがその性質を明らかにし、ポリ酢酸ビニルグラフト紙について振動リード法を用いてケン化度による動的弾性率と損失弾性率の変化を森らが求めている⁵⁰⁾⁵¹⁾。また、ポリ酢酸ビニルをビーター添加したり含浸した試料について引張り強さと伸びの関係を求め⁵²⁾、更には引裂き強さ、耐折強さ、タフネスなどの性質を調べた Rohman の報告⁵³⁾がある。

一方、紙の用途は次第に高速加工に移りつつあり従来の静的測定結果だけでは類推できない現象が現われる。この点に注目して紙の衝撃破壊試験の必要性を論じ、衝撃破壊エネルギー及び繰り返し衝撃破壊寿命が含水率の変化によって最大値をとる現象を提示した門屋の報告⁵⁴⁾をさらに追究して、木村らは過渡現象測定装置を用いて破壊時の現象を時間的に拡大して衝撃時における破壊の機構を明らかにした⁵⁵⁾⁵⁶⁾。

一方、破壊は試料内の極部の応力集中によって起るという前提で、張力下の試料縁端部の応力集中を干渉ホログラフィで測定⁵⁷⁾したり、破断部の坪量が平均坪量より低い個所で起ることをX線透過写真法で求めたりする研究⁵⁸⁾が海外では盛んである。また、引張り過程での紙の組織内の変化が発熱や吸湿を伴う点をとらえ、赤外望遠温度計⁵⁹⁾やマイクロカロリメータ⁶⁰⁾で測定することによって、紙の力学的性質を解明する新たな知見が加わりつつある。

7. 紙の物性 (一般物性)

紙の物性を研究する過程として前項の力学的性質以外に例えば光学的あるいは電気的性質の研究も重要であり、これを一般物性としてここにまとめることにする。

紙のワイヤマークと地合については従来ほとんど肉眼による感覚的な判定によって決められてきたが、計測技術の進歩に伴い測定と定量的表示が可能となった。

土田らはまず新聞用紙面に斜光線を入射したときの影の長さを微小面にとらえ、光電変換させることによりワイヤマークの記録を可能とし⁶¹⁾また回転する円筒試料の微小透過光の強度変化を記録した波形の周波数分析を行なって地合を定量化する可能性を検討した⁶²⁾⁶³⁾。更に村田らはこの方法を改良し、放射線プラスチックフィルムで試料を露光する方法を開発し、試料の色の違いやシート構造による散乱光の違いなどを消去した測定法によって叩解度と地合の関係を明らかにした⁶⁴⁾⁶⁵⁾。紙の地合の研究はほとんど時期を同じくして海外でも研究され、ホログラフィ的な表現法⁶⁶⁾や村田らと類似の放射性カーボン混入フィルムなどを用いた

Normanの解析法などが知られている⁶⁷⁾。紙は多孔質な材料であり、コーティングや印刷時の液の浸み込みがその品質を左右する大きな因子であると見なされているが、そのためには紙の空隙構造を調べる必要がある。Corteは1958年にジオキサン法を用いて紙の細孔径分布を測定しているが⁶⁸⁾、最近山内らは空隙内に水銀を圧入してゆく方法を用いて空隙構造の測定と解析を行なっている^{69)~72)}。また塩沢は紙の多孔構造モデルを想定し液体と気体について透過性の理論式を提案している⁷³⁾。一方障子紙などのような高通気性の紙の透気度測定法としてガーレ試験機に変る新しい測定法を三井らは提示している⁷⁴⁾。

紙の種々の用途の中で電気絶縁紙はか酷な条件の下で製造し使用される。この点に注目した研究が寺田らによって行なわれ、絶縁紙の真空乾燥と透気性の変化⁷⁵⁾、積層巻きた絶縁紙の層間通気性の測定⁷⁶⁾、真空乾燥した絶縁紙の熱伝導率の測定⁷⁷⁾などが本誌に発表されている。これとは別に従来比較的測定困難であった紙の熱伝導率の測定法を確立し湿度と温度の依存性を各種の和紙やクラフト紙で求め、さらに紙の密度との関係について考察した寺崎らの報告がある^{78)~80)}。

紙の用途の大半を占める印刷用紙の評価方法には古くから多くの判定法が用いられているが、紙の表面性と圧縮性を求めるためにChapmanの試験機が使われてきた。この方法は試料面と印刷版面に相当するガラスプリズムとの光学的接触比で求めているが、接触面間にはインキ層は界在していない。そこでインキ層に相当する材料としてセロハンテープを用い、試料との接触状態を光学的に求め定量化しようとする試みが安藤らによって行なわれ、新聞用紙、上質紙、コート紙についてこの方法による評価と検討が行なわれている^{81)~84)}。また、従来のベック式平滑度の問題点を指摘し新しい測定法について提案した山本らの報告⁸⁵⁾や紙の微小表面の判定に用いられる触針式表面アラサ計を解析してスクラッチングの影響などに言及した村上らの報告⁸⁷⁾があり、またパルプ表面の白色度の問題を検討した飯田の報告⁸⁸⁾がある。紙のサイジングの研究としては隅川らはロジン液が241~243 m μ に特性吸収があることを利用して、紙及び白水中に含まれるロジンサイズを測定しサイズ度との関連を調べている⁸⁶⁾。

8. その他の研究動向

この項では上記7項目中に分類できなかった報告、すなわち各種加工紙の製造とその物性、評価方法をとりあげ、またそれ以外の報告もこの項にまとめた。

中田はPVA-デンプンを併用した塗料の流動性を

ハーキュレス高ずり速度粘度計で求め原紙との表面物性との関係を調べ、100 m/minのパイロットコータで塗工した試料の印刷性の関係を求めた研究^{89)~90)}を行なっている。また、近藤らは加工紙の研究の1つとして流動性の問題をとりあげ、細管押出式粘度計を用いてPVA誘導体を含む塗料を $10^5 \sim 10^6 \text{ sec}^{-1}$ のずり速度で流動特性を測定している^{91)~92)}。コート紙のクレーに着目した研究としてはX線回折法を用いたクレーの分析法について述べた岡本らの報告⁹²⁾がある。

最近の電子顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡の発達と普及により紙の構造の微視的観察が可能となり海外では数多くの観察結果が発表されているが、わが国においても今村らによるコート紙表面の観察手法の確立¹⁰²⁾に続いて浜田による一連の報告がある。まずコート紙の表面を電子顕微鏡で観察する場合の新しいレプリカ法を提案し、マイグレーションの解析を行ない⁹⁴⁾、次に紙の表裏差と填料分布について検討している⁹⁵⁾。続いて基紙を72%硫酸で溶解して得たコート層と基紙との界面を観察する方法を提案し⁹⁶⁾、またコーティングカラーの浸み込みと原紙の表面特性との関係を調べている⁹⁷⁾。また、紙の表面の電顕写真から立体解析法により面の凹凸を算出する方法について論じ⁹⁸⁾、カラーの浸み込み深度の測定を行なっている⁹⁹⁾。更に新しい分析機器である反射電子検出器及びX線マイクロアナライザーを用いてコート原紙層内の填料の成分とその分布状態について調べている^{100)~101)}。より直接的な研究として塗工紙のレジスター特性とくに印刷におけるレジスター挙動の解析とそのコントロールの方法、寸法安定性と大気湿度の関係、カールに対する検討などを追究した高橋らの研究^{103)~106)}がある。

また、中田はテスト用サイズプレスと24 m/minのテスト抄紙機を用いてサイズプレスサイジングの検討を行ない、浸み込みとサイズ効果について論じている。

以上加工紙を中心にまとめたが、その他の研究を並記すれば抄紙の研究は山田が一貫して検討を行っており^{107)~109)}、不織布のドレープ性を応力-ひずみ曲線を中心として解析した大沢の報告¹¹⁰⁾や複合材料という観点で炭素繊維紙の抄造とその物性について論じた松尾の報告¹¹¹⁾がある。

9. 結 び

以上パルプ紙の基礎的研究の動向を製紙物性という観点から本誌の過去10年間に発表された研究論文を出来るだけ収容し多少の内外の資料を加えてまとめた。内容を出来るだけ網羅することを心掛けたために説明に不十分な点があったことをお詫びしたい。なお、海

外の情報についても十分に盛り込めなかったことは残念であり、これについては最近幾つかの展望や総説があり文献^{(12)~(16)}を末尾に掲示した。

これから明らかなように製紙物性の研究は、例えば、1973年ケンブリッジのシンポジウムで見られるようにレーザと液晶などを利用した新しい方向に展開しつつあり、また数学者や土壌物理学者などが参加した総合的な学問になりつつある。今後の紙の高次利用を考える意味でも我が国においてもこのような姿勢を作り上げる必要が今や来ているものと考えられる。

引用文献

- 1) H.F.Rance : Consolidation of the Paper Web, Vol. 1, p. 13, 1966, BPBMA
- 2) Van den Akker, et al. : Tappi, 41, 416, 1958
- 3) 臼田誠人, 他 : 紙パ技協誌, 20 : 5, 1966
- 4) D.H.Page, et al. : PPR/50, 98, 107, 108 PPRIC 1971~1974
- 5) W.F.Cowan and E.J.K.Cowdrey, Tappi, 57 : 2, 1974
- 6) P.A.Tydemann, et al. : Consolidation of the Paper Web Vol. 1
- 7) Alf de Ruvo, STFI Serie B 183
- 8) O.Forgas, A.Robertson and S.Mason : Fundamentals of Paper Making Fibres
- 9) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 28, 12, 1974
- 10) 尾鍋, 中野 : 紙パ技協誌, 24, 4, 1970
- 11) W.Schempp : Das Papier, 29 : 12, 1975
- 12) W.L.Ingmanson, E.F.Thode : Tappi, 42 : 83, 1959
- 13) H.G.Higgins, et al. : Tappi, 56, 8, 1973
- 14) M.D.Fahey : Tappi, 53 : 11, 1970
- 15) 岩崎, 中野, 臼田, 右田 : 紙パ技協誌, 21, 10, 1967
- 16) 村田, 中田, 遠藤 : 紙パ技協誌, 28, 4, 1974
- 17) 村田, 中田, 遠藤 : 紙パ技協誌, 26, 2, 1972
- 18) J.Colley, et al. : The Fundamental Properties of Paper Related to its Uses, Vol. 1, p. 394, 1976
- 19) G.Scurfield : Tappi, 1975 International Paper Physics Conference
- 20) 臼田, 伊藤, 中野, 右田 : 紙パ技協誌, 22, 6, 1968
- 21) 土田, 稲留, 門屋 : 紙パ技協誌, 26, 7, 1972
- 22) 門屋 卓 : 紙パ技術予測報告書, No. 4, 抄紙編, 1976
- 23) H.Meyer : Tappi, 54 : 9, 1971
- 24) J.Parker and D.Hergert, Tappi, 51 : 10, 1968
- 25) D.Wahren : Svensk Papperstidn, 67 : 536, 1964
- 26) B.Norman, et al. : Svensk Papperstidn, 77, 1974
- 27) V.W.Punton, et al. : Tappi, 1975 Internat'l. Phys. Conf.
- 28) 武田, 矢ヶ部 : 紙パ技協誌, 28, 1, 1974
- 29) 武田, 矢ヶ部 : 紙パ技協誌, 28, 5, 1974
- 30) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 28, 10, 1974
- 31) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 28, 11, 1974
- 32) 村田, 石黒, 横山 : 紙パ技協誌, 29, 1, 1975
- 33) 村田, 石黒, 横山 : 紙パ技協誌, 29, 2, 1975
- 34) 矢ヶ部, 甲斐 : 紙パ技協誌, 29, 10, 1975
- 35) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 28, 9, 1974
- 36) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 28, 8, 1974
- 37) 石黒久三郎 : 紙パ技協誌, 29, 3, 1975
- 38) H.Bjelkhagen, et al. : STFI Serie B Nr 304
- 39) D.M.Shelhammer : Tappi, 58 : 5, 1975
- 40) L.S.Nordman, Fundamentals of Papermaking Fibers p. 333, 1958
- 41) 岩崎, 臼田, 富崎, 岩崎, 中野, 右田 : 紙パ技協誌, 21, 7, 1967
- 42) 岡村武文 : 紙パ技協誌, 20, 3, 1966
- 43) 高塚, 臼田, 中野 : 紙パ技協誌, 24, 11, 1970
- 44) 木村, 臼田, 門屋 : 繊維学会誌, 30, 5・6, 1974
- 45) N.L.Salmén, et al. : Svensk Papperstidn Nr 6, 1977
- 46) A.De.Ruvo, et al. : Fundamental Properties of Paper Related to its Uses, Vol. 2, p. 785, 1976
- 47) 臼田, 大内, 伊藤, 中野, 右田 : 紙パ技協誌, 23, 3, 1969
- 48) 李, 藤井 : 紙パ技協誌, 20, 3, 1966
- 49) 李, 藤井 : 紙パ技協誌, 20, 10, 1966
- 50) 森, 村上 : 紙パ技協誌, 26, 8, 1972
- 51) 森, 村上 : 紙パ技協誌, 26, 9, 1972
- 52) ルトファー・ラーマン, 藤井 : 紙パ技協誌, 25, 2, 1971
- 53) ルトファー・ラーマン, 藤井 : 紙パ技協誌, 25, 4, 1971
- 54) 門屋 卓 : 紙パ技協誌, 25, 9, 1971
- 55) 木村, 門屋 : 紙パ技協誌, 30, 11, 1976
- 56) 木村, 門屋 : 紙パ技協誌, 30, 12, 1976
- 57) M.B.Lyne : The Fundamental Properties of

- Paper Related to its Uses, Vol. 1, p. 74, 1976
- 58) J.M.Moffatt, et al : The Fundamental Properties of Paper Related to its Uses, Vol. 1, p. 104, 1976
- 59) P.David, et al. : Svensk Papperstidning, 65 : 698, 1962
- 60) K.I.Ebeling : The Fundamental Properties of Paper Related to its Uses, Vol. 1, p. 304, 1976
- 61) 土田, 半田, 門屋 : 紙パ技協誌, 20, 9, 1966
- 62) 土田, 半田, 門屋 : 紙パ技協誌, 21, 1, 1967
- 63) 土田, 半田, 村田, 門屋 : 紙パ技協誌, 21, 6, 1967
- 64) 村田, 中田, 遠藤 : 紙パ技協誌, 26, 1, 1972
- 65) 村田, 中田, 遠藤 : 紙パ技協誌, 26, 2, 1972
- 66) Collier, R.S. : Optical Holography (Academic Press N. Y 1971)
- 67) B.Norman, et al. : The Fundamental Properties of paper Related to Its Uses, Vol. p. 7, 1976
- 68) H.Corte : Fundamentals of Papermaking Fibres, p. 301, 1958
- 69) 小野木, 山内, 村上, 今村 : 紙パ技協誌, 28, 3, 1974
- 70) 山内, 村上, 今村 : 紙パ技協誌, 29, 9, 1975
- 71) 山内, 村上, 今村 : 紙パ技協誌, 30, 5, 1976
- 72) 蓮池政雄 : 木材学会誌, 20, 541, 1974
- 73) 塩沢健男 : 紙パ技協誌, 20, 12, 1966
- 74) 三井, 立岩, 安藤 : 紙パ技協誌, 21, 4, 1967
- 75) 寺田, 伊藤, 丸井 : 紙パ技協誌, 22, 2, 1968
- 76) 寺田, 伊藤, 丸井 : 紙パ技協誌, 22, 4, 1968
- 77) 寺田, 伊藤, 丸井 : 紙パ技協誌, 23, 5, 1969
- 78) 寺崎, 松浦 : 紙パ技協誌, 26, 4, 1972
- 79) 寺崎, 松浦 : 紙パ技協誌, 26, 10, 1972
- 80) 寺崎, 松浦 : 紙パ技協誌, 27, 11, 1973
- 81) 安藤, 仲田, 門屋 : 紙パ技協誌, 23, 7, 1969
- 82) 安藤, 仲田, 門屋 : 紙パ技協誌, 24, 11, 1970
- 83) 安藤昭二 : 紙パ技協誌, 24, 12, 1970
- 84) 安藤昭二 : 紙パ技協誌, 25, 1, 1971
- 85) 山本, 海田, 岩崎 : 紙パ技協誌, 20, 2, 1966
- 86) 隅川, 岸, 戸田 : 紙パ技協誌, 22, 3, 1968
- 87) 村上, 今村, 山本 : 紙パ技協誌, 27, 2, 1973
- 88) 飯田幾太郎 : 紙パ技協誌, 20, 4, 1966
- 89) 中田幸次郎 : 紙パ技協誌, 21, 2, 1967
- 90) 中田幸次郎 : 紙パ技協誌, 22, 8, 1968
- 91) 近藤, 堂谷, 西林 : 紙パ技協誌, 25, 4, 1971
- 92) 近藤, 堂谷, 西林 : 紙パ技協誌, 25, 6, 1971
- 93) 岡本, 飯田 : 紙パ技協誌, 21, 2, 1967
- 94) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 24, 6, 1970
- 95) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 24, 10, 1970
- 96) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 26, 2, 1971
- 97) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 26, 3, 1971
- 98) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 29, 11, 1975
- 99) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 29, 12, 1975
- 100) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 30, 8, 1976
- 101) 浜田忠平 : 紙パ技協誌, 30, 9, 1976
- 102) 今村, 山岡, 青木, 前田 : 紙パ技協誌, 21, 8, 1967
- 103) 高橋, 白石, 岩田 : 紙パ技協誌, 23, 11, 1969
- 104) 高橋, 白石, 岩田 : 紙パ技協誌, 23, 12, 1969
- 105) 高橋, 白石, 岩田 : 紙パ技協誌, 24, 2, 1970
- 106) 高橋, 白石, 岩田 : 紙パ技協誌, 24, 3, 1970
- 107) 中田幸次郎 : 紙パ技協誌, 24, 8, 1970
- 108) 山田都一 : 紙パ技協誌, 21, 2, 1967
- 109) 山田都一 : 紙パ技協誌, 21, 3, 1967
- 109) 山田都一 : 紙パ技協誌, 21, 6, 1967
- 110) 大沢寿也 : 紙パ技協誌, 20, 1, 1966
- 111) 松尾隆吉 : 紙パ技協誌, 30, 12, 1976
- 112) 中野, 臼田 : 繊維と工業, 5, 12, 1972
- 113) 門屋 卓 : 繊維学会誌, 32, 1, 1976
- 114) 門屋 卓 : 紙パ技協誌, 30, 11, 1976
- 115) 門屋 卓 : 紙パ技協誌, 30, 12, 1976
- 116) 門屋 卓 : 繊維学会誌, 33, 3, 1977