技 術 報 文

高濃度抄紙技術の研究開発（第1報） パルプの流動及びフロック化特性の評価

製紙技術研究組合 第2研究部会 竹内 伸夫^{*1)}, 丹羽 文夫^{*2)}
吉村 三郎, 野村 忠義^{*1)}

Research and development of high consistency forming (1) Evaluation of the flocculation and flowing characteristics of pulp

Nobuo Takeuchi^{*1)}, Fumio Niwa^{*2)}, Saburo Yoshimura and Tadayoshi Nomura^{*1)}
Research Association of Pulp and Paper Technology 2nd. Div.

An instrument termed concentric cylinder viscometer has been made for evaluating the flowing characteristics and the fibre flocculation of pulp suspension.

Fluidity of pulp suspension is estimated from the relations between the tangential velocities and the wall shear stresses exerted on the surface of inner cylinder. On the other hand, fiber flocculation is measured by detecting variation in the intensity of light transmitted through the flowing pulp suspension.

This paper presents the applications of the instrument to the measurement of fluidity and flocculation in various consistencies of bleached hardwood and softwood sulfate pulp suspensions.

Furthermore, beating effects on the flocculation and the effects of deflocculant (anionic polyacrylamide) on the fluidity and flocculation of 3% hardwood pulp suspension are briefly described taking account of high consistency forming.

Keywords : Fiber flocculation, Bleached hardwood and softwood sulfate pulp,
Anionic polyacrylamide

1. 緒 言

製紙原料の主な構成体である木材繊維をシート状の紙にした場合の大まかな性質は手抄紙で評価され、また抄紙機のウェットエンドのろ水性や叩解による原料の性質変化などはDynamic Drainage Jar Testerや

Freeness Testerによって評価されることが実験室レベルで行われている。

一般に、紙の製造プロセスでは多くの水を使って木材繊維を水中に懸濁させてスラリー状にして配管系で輸送し、ヘッドボックス内で均一に分散させてジェットとしてワイヤー上に噴出させている。

このように、流動している製紙原料の挙動を知り、かつ紙層形成と密接な関係にある繊維のフロック化・分散に関する情報を得ることは適正な製紙原料の選択や製紙工程における現象の把握、更には製紙機械の設計にとって必要な条件となる。

現所属：^{*1)} 山陽国策パルプ株式会社

^{*2)} 王子製紙株式会社

Present address: ^{*1)} Sanyo Kokusaku Pulp Co., Ltd.

^{*2)} Oji Paper Co., Ltd.

流動している繊維懸濁液の流動性や繊維ネットワーク, 繊維フロック化を研究する方法としては原料循環を行う円管フロー系が用いられており, 数多くの報告が出されている^{1~10)}。

しかしながら, 円管フロー系では装置構成が複雑となり, また一度に大量の原料を必要とするために大きなスペースが要求されるとともに, 操作する上でも複雑であるなど多くの問題があって簡単に実験を行うわけにいかない。

本報告で紹介する同軸円筒回転粘度計は, 非ニュートン流体であるパルプ懸濁液の流動性を測定するのに適しており, Couette Type の装置である。このタイプの粘度計は広く知られており, 過去にも数名の研究者によってパルプ懸濁液の研究に用いられてきた^{11~13)}。

今回報告する装置は製紙原料の流動性及びフロック化の計測に適した構造としてあり, 以下にパルプ濃度・原料の種類・叩解度及び叩解方法・薬品添加に関連したいくつかの応用結果について述べる。

2. 実 験

2.1 同軸円筒回転粘度計

装置は径の異なる2つの透明アクリル製円筒で構成されている(図1, 2)。

内筒の外径は150 mmであり, 外筒の内径は種々変えられるが, 本実験では主として160 mmとした。従って両円筒の間隙は5 mmとなる。また, 内・外筒の高さはそれぞれ17 cm, 21 cmとした。

本装置では本体の下部に設置してある速度制御され

Fig. 1 Concentric cylinder viscometer

Fig. 2 Suspension in the annulus and the devices for measuring fluidity and flocculation

た700 WのDCモーターにより駆動され, ベルトで回転を伝送して外筒を所定の速度で回転するようにしてある。円筒の設計最大回転数は3,000 rpmである。

また, 外筒を回転したときに内筒の壁面に発生する応力は, 内筒を釣り下げている心棒のつけ根に設けられているトルク検出器により電気信号に変換されて, デジタル表示或はアナログ信号としてとり出すことができる。繊維懸濁液の分散やフロック化は装置本体の外側に設置された投光器で円筒間隙内を照明し, 透明円筒を透過した光の変動を内筒の壁面に密着して備えてあるフォトトランジスターによって光電変換された信号を分析することにより測定する。

更に紙料の準備を容易とするため, 内筒はトルク検出器とともに上下に昇降できるようにリニアヘッドモーターへと直結されており, スイッチおよび上限・下限リミッターにより任意, 垂直位置に半自動で設定することができる。

検出されたトルクや透過光変動の電気信号は, 本体につけられている各々の回路ボックスよりアンプに送り, 多機能の信号分析装置がX-Yレコーダーで計算処理, 記録するようになっている(図3)。

2.2 壁面せん断応力及びフロック化の測定

1) 壁面せん断応力

外筒が回転すると, 円筒間隙に入れられている水やパルプ懸濁液内の繊維ネットワークによって内筒壁面にせん断応力が伝えられる。

本装置ではトルク検出器によって内筒に作用するト

Fig. 3 Analytical system for measuring fluidity and flocculation of pulp suspension

ルクを検出し、次式によって壁面せん断応力を算出した¹⁴⁾。

$$\tau_w = T / 2 \pi r_1^2 h \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 T ：内筒に作用するトルク

r_1 ：内筒の外半径

h ：内筒に接触する液面高さ

2) フロック化

繊維のフロック化の程度は、局所的な繊維懸濁液の濃度のばらつきで定義することが容易な方法とされており、この濃度のばらつきは懸濁液を貫く微視的な透過光の変動量で表すことができる。厳密には平均透過光強度と平均繊維濃度との間には非線型な関係にあるが、一定の紙料や濃度で相対的なフロック化の程度を相互に比較するには次式のフロック化指数を用いても可能である。

$$F = \frac{dI}{\bar{I}} \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで

$$dI = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I - \bar{I})^2 dt}$$

= 透過光変動の根二乗平均値

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \text{平均透過光強度}$$

T ：十分に長い平均化時間

3. 結果と考察

3.1 流動性の表現

図4は水の流動性を示す。円筒間隙の水が層流で流動している場合は接線速度と壁面応力の間には線型の

関係があり、その比例定数が粘度を示すことになる。しかし、この図の示すように、両者の間には接線速度 50 m/min 以上で非線型な関係になっていることから乱流状態の流動をしていることが分かる。

本装置での水に対する流動性の実験式は次式で表される。

$$\tau_w \propto V_T^{1.75} \quad \cdots \cdots (3)$$

τ_w はパイプ等の流路における流れの方向の圧力損失 ($\Delta P/L$) と比例しており、流速と関係した繊維懸濁液の3つに大別される流域（栓流、混流、乱流）に対応して(3)式の指数が変化するとわれ¹⁰⁾、この式はパイプ内を流動する繊維懸濁液に関して報告されてい

Fig. 4 Fluidity of water in turbulent flow

る関係とはほぼ類似している^{5,6,8)}。

3.2 繊維懸濁液の流動性とフロック化

図5に広葉樹漂白パルプ1.0%濃度の流動性のフロック化の接線速度に対する関係を示す。

接線速度200 m/minまでは水の線よりも高い壁面応力を示し、更に速度が増すと応力は水よりも減少し始め、その後、水と平行になる。これは低速流域では繊維ネットワーク（繊維プラグ）による壁面摩擦が大きく、結果として内筒に作用する応力を高くしていることによる。

また、流速が高くなると非ニュートン流体である繊維懸濁液も乱流状態へと移行するために、水のようなニュートン流体と同様な流動挙動を示し始める。特に、接線速度が200 m/minを越すと水よりも低い壁面応力を示すことについては、繊維の存在が円環の半径方向への運動量の伝達を阻害するためと言われる⁷⁾。

Fig.5 Fluidity and flocculation of 1.0% hardwood bleached sulfate pulp. CSF 550 cc

このような乱流状態と流動については次式が提案されており、上記の説明を良く表現できる。

$$\tau_{\text{turb}} = \mu \frac{d\bar{V}}{dy} + \eta \frac{d\bar{V}}{dy} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$\bar{V}$: 流体の平均局所流速

μ : 動粘度

η : 乱流状態に依存する動渦粘度

繊維のフロック化（この場合は分散）については流動性のような特異点は見られず、接線速度の上昇に従って単調に減少している。但し、接線速度が700 m/minという高速になっても最小値には至っていない。

これは乱流強度の大きさととの関係が強く影響し、本装置の円筒円環内での乱流の発生が弱いためと考えられる。

3.3 パルプ濃度と流動性

広葉樹漂白硫酸塩パルプの種々の濃度における流動性を図6に示す。

Fig.6 Fluidity of hardwood bleached sulfate pulp for various consistencies. CSF 550 cc

パルプ濃度の上昇とともに壁面応力が極めて増加しており、例えば速度100 m/minではパルプ濃度0.5%から3%の6倍になると応力は約15倍にもなっている。

但し、速度が大きくなり乱流が進むと応力（壁面摩擦）がパルプ濃度に依存しなくなり、水の直線と平行になってしまう。

この結果は種々の径のパイプ中を流れる繊維懸濁液による圧力損失の曲線と類似しており、同軸円筒回転粘度計が繊維懸濁液の流動性を評価するのに十分対応できることを示している。

3.4 広葉樹と針葉樹の繊維懸濁液についての流動性比較

図7にパルプ濃度0.5, 1.0%における広葉樹及び針葉樹繊維懸濁液の流動性を示す。

針葉樹パルプでは広葉樹パルプに比べて高い壁面応力を示し、繊維長の違いが大きく寄与しているものと考えられる。

また、図7で水の直線と繊維懸濁液の流動曲線とが交差する点を Drag Reduction の始まりと呼ばれ、流

Fig. 7 Comparison of the fluidity for hardwood and softwood bleached sulfate pulp

動性の1つの目安となっている。

図6, 7で求めた広葉樹及び針葉樹繊維懸濁液についての濃度に対する Drag Reduction 開始速度をプロットしたのが図8である。

パルプ濃度 0.5%における広葉樹及び針葉樹パルプの Drag Reduction 開始時での壁面応力はそれぞれ 11 dynes/cm², 60 dynes/cm² であり, 1.0%では 60 dynes/cm², 160 dynes/cm² となっている。

さらに, 3%の広葉樹では図8の直線を外挿して図6より求めると 7,000 dynes/cm² にもなり, 濃度増にと

Fig. 8 Onset of drag reduction for unbeaten hardwood and softwood bleached sulfate pulp vs. pulp consistency

もなって壁面応力が急激に増加することを認めた。

3.5 広葉樹と針葉樹繊維懸濁液の繊維フロック化比較

流動性と同時に測定してきた濃度 0.5%, 1.0%における広葉樹と針葉樹繊維懸濁液のフロック化の比較結果を図9に示す。

0.5%, 1.0%の両者について広葉樹と針葉樹の差が極めて大きく, 流速に対する繊維分散の傾向にも差が見られる。

また, 両者の繊維懸濁液について 0.5%では比較的低い周速で, $V_T=200\sim300$ m/min で分散が一定値に到着するが, 1.0%になると高速 (700 m/min) になっても分散の進行が認められる。

これは, 本装置での円環内での乱流強度が低い (滑らかな円筒表面) ために分散の効果が弱いと考えられる。

但し, 製紙原料の相対的な分散特性を評価するには問題はない。

Fig. 9 Flocculation for unbeaten hardwood and softwood bleached sulfate pulp vs. tangential velocity

3.6 叩解による高濃度繊維懸濁液の繊維フロック化への影響

図10に3%広葉樹繊維懸濁液のフロック化について粘状叩解と遊離状叩解の両者を比較して示す。

周速 100 m/min 前後において一度フロック化が進んだように見えるが, これは円筒が回転しているときに, フロックを含んだ繊維ネットワーク間に切れが生じたために現れた現象であり, 目視観察や高速写真観察から確認している。

Fig. 10 Beating effects for flocculation. 3% hardwood bleached sulfate pulp

周速が100 m/minを過ぎると、大きなサイズのフロックが小さなサイズのフロックへと分離され、フロックにロックされない自由な繊維の数が増え始めるという繊維の分散化が進行していることが分かる。

粘状及び遊離状の両者の叩解については、未叩解に比べて繊維の分散性が良く、叩解度が進んだ程その傾向が大きい。特に、粘状叩解に比べて遊離状叩解では叩解度が繊維分散に及ぼす影響は大きく、これは平均繊維長の変化に寄る所が大と考えられる。

例えば、図10の未叩解から遊離状及び粘状叩解ろ水度CSF 350 mlに至る平均繊維長はそれぞれ表1に示す通りであった。

Table 1 A list of mean fibre lengths in various beating levels

	CSF (ml)	Mean fibre length (μ)
Unbeaten	520	540
Wet beating	420	509
"	350	513
Free beating	420	493
"	350	459

しかしながら、叩解された繊維懸濁液の分散性の差は高速(400 m/min付近)になると小さくなっている点は注目される。

3.7 高濃度繊維懸濁液の繊維分散に対する分散剤の効果

高濃度抄紙を意図する場合に、最も大きな問題点は紙の地合と関連した繊維の分散であるが、濃度が高くなると図6、図10に見られるように繊維フロックを破

壊することや再フロック化を防ぐことが困難になってくる。

繊維のフロック化は繊維の長さや柔軟性等といった繊維自身の性質と、繊維をとりまく電氣的な諸条件と密接な関係にある。

ここに挙げた分散剤としては、繊維同士の反発を促すアニオン性ポリアクリルアミド(分子量1,000万)であり、粘度・曳糸性がともに高い粘剤として知られている^{15,16)}。

図11に分散剤添加、無添加における3%広葉樹繊維懸濁液の流動性及び分散性を示す。

流動性の曲線は分散剤の無添加時に比べて、添加時は周速400 m/minまで応力が低く平坦であるが、更に周速が速くなると急激に応力が上昇し、最終的に無添加時と一致した流動曲線を描く。この現象は高分子電解質である分散剤が失効したことを示す。

このことから、分散剤の使用には注意を要し、ファンポンプなどの高い剪断力が掛かる場所を通過させることは避けるべきであることが分かる。

分散剤添加による繊維分散の効果は図11の下に示してある。

周速100 m/min程度までは無添加時と同程度のフロック化であるが、300 m/min前後でフロック化が極

Fig. 11 Effects of the deflocculant for the fluidity and flocculation of 3% unbeaten hardwood bleached sulfate pulp

めて悪化しているように現われている。この現象は3.6の項目で述べた理由と同様であるが、特に高速側で生じているのは分散剤の添加によって繊維ネットワークが弾性体に似た構造となり、円筒の壁面で滑るためと考えられる。

また、周速が速くなって分散剤が失効し始めると、繊維のフロック化も流動性と同様に無添加時のフロック化曲線に一致している。

しかしながら、この装置の構成では分散剤の効果が全く見られず、流体内部の攪拌を強化する必要があるので、図12に示すような突起を内筒に接着させて実験を行った。

Fig.12 Modified cylinder for evaluating dispersive effects of deflocculant

Fig.13 Effects of the deflocculant for the flocculation of 3% unbeaten hardwood bleached sulfate pulp using modified cylinder

改造した同軸円筒による分散効果の結果を図13に示す。

周速 490 m/min では分散剤添加によって、トルクが大きく減少しているが、フロック化への影響が小さい。更に周速を上昇させてゆくと、無添加時に比べて分散が進んでいることが分かる。

このように、分散剤の効果を十分に発現させるには流体内部での大きな攪拌をさせることが必要である。

また、図11に示したように周速が 400 m/min を越しても、分散剤が失効していないという矛盾した結果となっているが、突起をつけることによって流体の平均流速が抑えられ、突起背後に発生した乱流の渦による攪拌が十分に行われたためと考えられる。

4. ま と め

同軸円筒回転粘度計タイプの装置を作成し、これが製紙原料の繊維懸濁液についての流動性及びフロック化の評価に十分採用できることを確認した。

特に、分散剤のような粘剤の実験には懸濁液内部の攪拌効果を高める突起付きの円筒を用いることが有効であることを認めた。

引用文献

- 1) Mih, W. and Parker, J., Tappi 50(5) : 237 (1967)
- 2) Sanders, H. T. and Meyer, H., Tappi 54(5) : 722 (1971)
- 3) Duffy, G. G., Moller, K. and Titchener, A. L., Appita 26(3) : 191 (1971)
- 4) Duffy, G. G., Titchener, A. L., Lee, P. E. and Moller, K., Appita 29(5) : 363 (March 1976)
- 5) Duffy, G. G., Appita 28(5) : 309 (March 1975)
- 6) Duffy, G. G. and Titchener, A. L., Svensk Papperstidn. nr 13 : 474 (1975)
- 7) Duffy, G. G. and Lee, P. F. W., Appita 31(4) : 280 (January 1978)
- 8) Forgacs, O. L., Robertson, A. A. and Mason, S. G., P. P. M. C. : 117 (May 1958)
- 9) Hemström, G., Moller, K. and Norman, B., Tappi 59(8) : 115 (1976)
- 10) Robertson, A. A. and Mason, S. G., Tappi 40(5) : 326 (1957)
- 11) Head, V. P., Tappi 35(6) : 260 (1952)
- 12) Thalen, N. and Wahren, D., Svensk Papperstidn. 31(6) : 226 (1957)
- 13) Stenuf, T. J. and Banikya, S., ESPRI Research Report(71) : 57 (October 1979)

- 14) Streeter, V. L. and Wylie, E. B., Fluid Mechanics, McGraw-Hill Book Co., 7 th Edition : 364-367 (1979) R 48 (1985)
- 15) Wagberg, L., Svensk Papperstidn. (6) : 317 (1985)
- 16) Jokinen, O. and Ebeling, K., Paperi ja Puu (5) : 317 (1985)

(受理 : 62.9.14)