多品種生産に対応した抄紙機ワイヤーパートのリテンション制御*

王子製紙株式会社 製紙技術研究所 森 芳立
 同 春日井工場 第二抄造部** 加来 正年
 同 春日井工場 パルプ部 末田龍三郎
 同 春日井工場 施設部計装システム課 水野 昭夫, 飯尾 博明
 王子エンジニアリング株式会社 春日井エンジニアリング部 山田 訓雄

Retention Control System of Paper Machine
for Many Grades Production

Yoshitatsu Mori

Pulp and Paper Research Laboratory,
Oji Paper Co., Ltd.

Masatoshi Kaku

Kasugai Mill, Oji Paper Co., Ltd.

Ryuuzaburou Sueda

Kasugai Mill, Oji Paper Co., Ltd.

Akio Mizuno and Hiroaki Iio

Kasugai Mill, Oji Paper Co., Ltd.

Isao Yamada

Kasugai Engineering Dept.,
Oji Engineering Co., Ltd.

森 芳立

加来正年

末田龍三郎

水野昭夫

飯尾博明

山田訓雄

A retention control system trial was performed for the wet part of a papermaking machine. By introducing two intelligent pulp and ash (filler) low consistency sensors (Kajaani : RM-200 M) to the stock supply line of head box and the white water (WW) filtrate line of wire part, we can monitor its wet end process conditions continuously. The retention control system using these sensors stabilizes the wet part process by controlling WW consistency, that is by an appropriate action of the retention aid dosage using a gap added PI (Proportional plus Integral) controller. As many grades production is running and grade changes are run frequently in this paper machine, it is difficult to determine the target set value (SV) of WW consistency. So we developed a new algorithm to judge the process stability by itself and to

* 本内容は第 68 回紙パルプ研究発表会で発表

** 中越パルプ工業株式会社出向

determine the SV target value of WW consistency automatically.

Keywords : papermaking machine, wet part, retention control, many grades production, PI controller (proportional plus integral controller), sequential control, set value (SV value).

分類 : M_5 ワイヤー, V_3 紙パルプ工程制御システム, W_{10} 収率向上剤・歩留向上剤

1. はじめに

抄紙機はパルプマットの紙層を形成するワイヤーパート、パルプマットから搾水するプレスパート、紙匹を乾燥するドライヤーパート、製品として巻取るリールパートから構成される。本報で考察するウェットパートの概略フローと、その物量バランス例を図1に示す。パルプ工程から送られた種原料(濃度約3%)はウェットパートで低濃度(約1%程度)に稀釈されヘッドボックス(HB: head box)のスライスリップからワイヤー上に噴出される。中質紙などを抄造する本抄紙機では原料パルプとしてKP(広葉樹パルプ, 針葉樹パルプ), 古紙パルプを配合し, その他に填料(炭酸カルシウム), 紙力剤などを原料中に添加している。ワイヤーパートでは, フォイルなどの脱水設備を用いて原料から水分を濾過して, ワイヤー上にパルプマット(紙層)を形成していく。この時, ワイヤー上に原料が留まる割合をリテンション(歩留り)と呼ぶが, 本報では, このリテンションを安定に保つ制御の取り組みについて報告する¹⁾²⁾。

2. パルプおよび灰分低濃度計

対象とした抄紙機のワイヤーパートは抄幅が約5m, 長さは約18m程あり高速走行しながら原料中のパルプ, 填料をワイヤー上に抄上げて紙層を形成していく脱水プロセスである。抄速800m/分の場合, この紙層形成は僅か一秒間程度で終了する。ワイヤーから脱水した白水(WW: white water)中には微細なパルプ繊維, 填料成分が含まれるが, この白水はセーブオールで白水サイロに回収して, この中を5分程の滞留時間をかけて回流した後, 図1のフローのように種原料を稀釈する形で再びHBにポンプで供給して循環使用される。尚, パルプ繊維は長さ1~4mm, 幅20~40 μ m程度, 炭酸カルシウム粒子は3~4 μ m程度の大きさであり, ワイヤーには太さ0.2mm程, 目数150メッシュ程度の多重織りのプラスチックワイヤーが使われている。

ワイヤーパートに供給される原料濃度はごく薄く, しかも大容量の白水サイロと白水系の循環フローに起因する長いむだ時間と時定数を伴ってゆっくり変化

Fig. 1 Wet part and material balance.

してくる特徴を持つため、ウェットパートの濃度を連続的に計測したり、これを制御していくことは難しいとされてきた。そのため、従来、このパートからオンラインで得られる情報はほとんど無かったが、10 年程前に連続的にウェットパートの濃度、しかもパルプ繊維分、灰分の各濃度を区別して測定できる特殊センサーが海外で開発され、最近、国内でも操業管理用などとして広く使われるようになってきた。本取り組みでは Finland の Valmet Automation Kajaani 社製（現在、Metso Automation）の低濃度計（RM-200 M）³⁾二台を使用した。このセンサーの構造を図 2 に示す。これは光学センサーで、測定項目、測定範囲はトータル（全）濃度 $\leq 1.5\%$ 、灰分濃度 $\leq 0.8\%$ で、パルプ濃度 = （全濃度 - 灰分濃度）から算出する。測定原理はレーザー光がパルプ繊維を透過する際に光軸が約 90° 回転して偏光する性質を利用した偏光光量比 (①)、炭酸カルシウムなど灰分成分の微細粒子によるレーザー光の散乱形態差異 (②) と、後方反射の散乱光量 (③)、そして、光学的に微細パルプと微細な灰分粒子を区別することは難しいがキセノン光が試料を透過中にパルプ中のリグニン成分により吸収される光量 (④)、後方反射の散乱光量 (⑤) を測定して微細パルプと灰分成分とを識別することにより測定精度を上げている。これら①～⑤の 5 種類、全 14 信号を CPU に取込み、手分析による実測値と突き合わせて重回帰分析により全信号の中から相関の高い 5 信号程を選択、統計的に重回帰モデル式の係数値を決めて各濃度に換算する。ここでは HB、WW ラインの全濃度、灰分濃度用の計 4 本の重回帰モデル式を作成したが、何れも解析時に 98～99% の高い重相関係数を得た。センサー指示値はほぼ一秒毎に逐次、更新されるが、偶発外乱による異

常な突変を防ぐため、生の濃度信号値に重み付き移動平均のデータ処理を施して測定値の平滑化を計っている。また、白水のサンプリングラインは白水を気液分離槽に通して脱気した後、センサーに添加ポンプで供給しているが、時々、分離しきれなかった気泡が流入したり、定期的に行われるセンサーの自動水洗動作時に、この気液分離槽を経由しない清水中に含まれる細かい気泡がパイプ上側に溜まり、後で断続的に流出、特に WW ラインのセンサー指示値に誤測定のピークが、時々、発生し、この解消に手間取ったが、これらは、水洗後の測定開始タイミングの変更、気液分離槽の構造やサンプリング、清水配管系を調整することで、ほぼ回避することができた。

また、回帰モデル式の合わせ込み後の測定値の確認作業も繰返し行なった。運用時には解析時の母集団以外のデータとなるため、測定値の回帰式からの多少のズレはどうしても避けられないが、ほぼ信頼できる値として安定的に濃度測定が行なわれることを確認した（例えばトータル濃度では 0.1% 濃度幅程度の散布状況）。以上のステップを踏み、本センサーの測定値を用いたリテンション制御の取り組みに移行した。

3. ワイヤーパートのリテンション制御

海外ではワイヤーパートのリテンション制御が多く取組まれている⁴⁾⁵⁾。リテンション制御では HB の原料ライン、ワイヤー白水 (WW) ラインに前述の低濃度計を設置する。そして、この HB、WW 両ラインの測定濃度からワイヤーパートで重要な操業指標となる原料歩留り（全、パルプ、灰分）を、それぞれ次式から近似計算できる。

$$R_i(\%) \approx \{ (C_{HB,i} - C_{WW,i}) / C_{HB,i} \} \times 100$$

Fig.2 Low consistency pulp & ash sensor (Kajaani).

R : retention (%) C : consistency (%)

HB : head box WW : white water

i : total, pulp or ash.

ウェットパート、特に白水ラインの濃度を測定する場合、白水の脱水エリアはワイヤーパート全域にわたり、各所での濃度もかなり異なるはずであるが、今回は全体の白水を代表する濃度を測定する必要がある、白水側のサンプリング場所の選択は特に重要である。この抄紙機では、長網の後半にトップワイヤーが設置されており、トップワイヤー側の WW ラインは長網のボトムワイヤー領域から発生する白水とは別ラインで白水サイロに戻っている。低濃度センサーで測定する個所は、ボトムワイヤーからの白水とトップワイヤーからの白水が集合した白水サイロにすべきであるが、センサーの設置場所のボトムワイヤーの制約により、ここでは白水サイロに流入する個所の混合白水をセンサーに引き込むことにした。尚、この場所の白水濃度は、事前に白水サイロの回流白水濃度とほぼ同じであることを確認している。即ち、ここでは低濃度センサーを、HB の原料ラインとワイヤー濾水の WW ライン各一か所、合計 2 か所に配置することにし、まず、各測定濃度と、同時に計算される原料歩留りを、調成と抄造側の DCS (Distributed Control System) にガイダンス表示した。

一般に、高速抄紙機のワイヤーパートの原料歩留りはパルプ繊維で 70% 程度、微細粒子の灰分成分は

30% 程度と低く、この低歩留りを多少とも改善するために原料中に歩留向上剤が添加される。歩留向上剤には色々なタイプの薬品や添加法が提案されているが、このプロセスでは一液タイプのカチオン性高分子凝集剤の歩留向上剤添加方式を採用している。この添加方式に対して Kajaani 社が提案する歩留制御は、例えば図 3 に示す制御ループを組みフィードバック制御で WW の全濃度を一定値に保つように歩留向上剤の添加率 (流量) を添加ポンプに出力して増減する方式である。尚、歩留向上剤の添加率は、スタッフボックス流量のパルプ換算重量 (ADT : air-dried Ton) に対して大体 0.02~0.04% 程度である。

4. 多品種生産時の問題点

対象の抄紙機は約 200 種類程の製品を抄造しており品種の切替えが多い。品種替えは平均一日に 3 回、多い場合は 5~7 回にも上る。品種替えに伴ない抄速、坪量、原料配合、灰分率他が大きく変わり、その結果、抄紙機各ラインの濃度、流量が大きく変化する。それに加え、HB 送りの原料ラインは前述のように白水サイロの再循環ラインの白水を再使用していくフローとなっているため WW と HB 濃度が 30 分以上の長い時間遅れを伴ってゆっくり定常値に収束していく制御しにくいプロセス特性を持っている。

図 4 に長期間に渡って本センサーで測定した実操業時の濃度変化などの状態例 (2 日間) を示す。このト

Fig. 3 Retention control.

レンドから抄造製品の切替えに伴って抄速, 坪量などが変わり製品毎に HB, WW 原料のバランス濃度が大きく変化していることが判る。従来はオンラインの低濃度計がなかったため, ウェットパートの操業状況の正確な把握やコントロールは難しく, ワイヤ上

原料水切れ状況やクーチロールの真空値の状況, 原料, 白水サンプリングによる濃度実測などにより操業状態を判断していた。また, このトレンドから同一製品の定常操業時であっても HB, WW 濃度が変動したり, 途中で抄速が変更されると, 同様に HB, WW のパラ

Fig.4 Grade change timing and consistency trend.

Fig.5,6 Transitions of average consistency (upper) and retention (lower).

ンス濃度が変化することが観察される。この抄紙機では各製品の抄造タイミングは大雑把に月一回の頻度で回ってくるが、次に、抄造時期が異なる同一製品がバランスした HB, WW 濃度の差異について調査してみた。DCS から上位計算機のプロセス・コンピュータに操業データを自動的に取込み製品毎に安定時の平均濃度を自動計算するシステムを作って、半年程の期間をかけてデータを蓄積、追跡調査した。図 5, 6 に実操業結果の一例を示す。左から右に測定値を時系列でグラフ化した。この調査から、同一抄紙機で同一製品を抄造した場合でも、抄造時期によってバランスした濃度、原料歩留りはかなり異なってくるのが判った。本例の抄造銘柄（坪量：67.5 g/品）では HB 全濃度：0.8~0.9%, WW 全濃度：0.3~0.5% 程度、全歩留り：40~60%, パルプ歩留り：60~80%, 灰分歩留り：30~40% 程度の幅を持って変動しており再現性が見られなかった。また、他の抄造品種でも同様に安定濃度、安定歩留値には再現性が見られなかった。この原因として、パルプ原料の配合やフリーネス、ゼータ電位、pH、温度、脱水真空圧、マット積層状態の違いなど複合した影響が良く議論される。また、原料として個体差を持つ天然の木材パルプが使用されること、抄紙機のワイヤーなど用具類の状態の経時変化などの影響も考えられる。原料条件や抄造条件が僅かに違えばワイヤーパートに何らかの影響が及び同じ脱水状態にならないが、仮りに同じ原料を使い操業条件を同じにしても同じ脱水状態が再現できるとは限らない。同じ原料でもパルプ繊維や灰分などの積層状態、分布状態（紙厚さ方向や面方向）に微妙な差が出て脱水状態は変化してくるであろう。

5. 歩留制御について

ワイヤーパートの原料の歩留制御は 1990 年頃から最初に海外で取組まれ制御方法はほぼ確立されてきている¹⁵⁾。この歩留制御により、ウェットパートを安定化させ、操業性の向上、製品坪量、含有成分変動の安定などを計ることができるといわれており、我々もこれらの報告を参考にして調成工程に既導入されている DCS（横河電機：CENTUM-V）に歩留制御の機能を組み込み、実機に出力してコントロールを試みた。このプロセスへの歩留向上剤の添加方式は前述のように一液型の高分子凝集剤を用いた方式が採用されているが、我々は、基本的に Kajaani 方式を参考にして WW 全濃度を一定に保つフィードバック方式の歩留制御を用いた。

歩留向上剤は HB 直前で原料に添加されるため、添

加率を変更した場合、その一次効果は割合い早く濾過白水の変化に現われてくるが、種原料稀釈に使用される大容量の白水サイロ経由の再循環白水から来る薬品濃度変化の影響は 30 分以上の長い時間をかけて二次的に徐々に表われてくるため、先々の応答が予測しづらい。そのため歩留向上剤添加率の設定値は決めづらいし、頻繁な薬品添加率の加減操作は却ってプロセスに外乱を与える結果となり地合など製品品質への影響が心配される。

一般に、このようなむだ時間が長く制御しづらいプロセスに対しては、例えばサンプル値 PI 制御などが有効として良く適用されるが、ここでは、この歩留制御向けに新しく考案した機能を付加し易くするため、コントローラーとしてシーケンス制御とギャップ付き PI (D) 制御機能 (proportional plus integral (plus derivative) controller) とを組合わせて次のアルゴリズムを組み込んだ⁶⁾。

①ギャップ付き PI 制御は目標値に対し $\pm 10\%$ の不感帯域を設け、それを外れた場合に初めて歩留向上剤の添加率を増減操作する制御出力を出す。②制御周期は 40 分 (30 分 + 10 分) を一単位とし、③出力端の添加ポンプへの歩留向上剤添加率の一回の変更 (制御) 幅は一律、30 分かけてランプ状に (例えば) $\pm 0.001\%$ だけ変更、④その後、10 分の無操作の待機時間帯を設ける。

6. 安定化判定と目標値 (SV 値) の自動決定⁶⁾

ここで用いた歩留制御は単純なフィードバック制御であるが、これを、そのまま多品種生産を行なう抄紙機に組み込んだ場合、極めて使い勝手が悪いことが予想された。それは、品種替えの都度、オペレータが多くの抄造製品に対して経験的に WW の目標濃度 (SV 値: set value 値) の値を適切に決めてコントローラーに設定していく必要が生じるためである。WW 濃度の SV 値は少なくとも小数点以下 2 桁まで決めて設定する必要がある。

そこで、本プラントでは WW 濃度が安定してくればウェットパートがほぼ安定したとみなせると考えられるため、このプロセスの自律安定性を利用して、その値を自動的に採用して目標値 (SV 値) として採用する機能を DCS にシーケンスで組み込んだ。図 7 にこのアルゴリズムの全体フロー概要、図 8 に詳細アルゴリズムを示す。

安定化判定手続きは以下の通り。

- (1) 最初に品種替え終了信号 (フラグ) を検出し、品種替えから 30 分以上経過したか判定。尚、品

Fig. 7 Retention control steps.

種替え時に歩留向上剤の添加率は該当品種の規格値にリセットされている。

- (2) WW 全濃度の PV 値 (process value 値) を基準 WW 濃度に仮定 (C_{SV})。
- (3) 定周期毎 (1 秒毎) に WW 全濃度の安定判定。
($|\Delta WW \text{ 全濃度}| = |C_{PV} - C_{SV}| \leq 0.01\%$)
- (4) 安定状態が 15 分以上継続し最終チェックの上下限値内 (ex. $0.2\% \leq C_{SV} \leq 0.5\%$) ならば C_{SV} を目標濃度とする。
- (5) 目標 (SV) 値としてコントローラーに設定して歩留制御開始。

予め制御ループを自動モードに入れておけば、品種替えをチェック、続いて自動的にプロセスの安定状態を判定、目標値を決定してアラーム通知、オペレータは状態を再確認して歩留向上剤の添加率制御を開始する。尚、添加率が上下限を外れた場合にもアラームで通知、その場合にはオペレータの判断で自動制御を継続するか中断するかを決定する。

当初、歩留制御の WW 目標濃度を過去の操業実績から製品毎に一律に決めようとしたが、図 5, 6 に示したように同一製品でもウェット回りの濃度はその時期の操業諸条件のバランスから決まり一定しないため現実的な方法ではなかった。また、現状、薬品の添加率と抄紙機の操業状態、製品品質との関係を関数で表わすことも不可能である。

多くのプロセスはそれ自身の自律要素を持って運転されているのが実情であり、今回の歩留制御も WW 目標濃度の適正值を決めづらい一例であるが、多くの制約条件のある実操業下ではプロセス自体で自律的に自己安定に向かって収束して落ち着いていくことを利用して、この値を目標値 (SV 値) として帰納的に採用するのが現実的であると考えた⁷⁾。是非の議論はあるが、抄紙機のワイヤーパートにプラントの自己平衡化機能が働き、外乱が加わっても次第にあるレベルの安定化状態にプロセスが自然に落ち着いていくことを

Fig. 8 Process stability judgement and target conc. (SV) determine algorithm.

利用することにした。

7. コントロールテストの結果

7.1 事前テスト⁸⁾

Kajaani 方式の歩留制御を実行するに先立って、手動操作で介入しながらコントロールテストを実行して、歩留向上剤添加率の操作量と白水濃度の変動量との関係を確認した。また、本センサーを用いた過去の操業状況調査⁹⁾の結果、当該品種では、WW 灰分濃度が 0.3% を超えるとウェットパートの汚れに起因する欠陥 (粕穴) が発生する確率が高いことが判っていたため、目標 WW 灰分濃度を 0.3% に設定して、この濃度を目標値として歩留向上剤の添加率を操作した。

図 9 に、WW 灰分濃度、トータル歩留り、灰分歩留りの変化推移と歩留向上剤の添加率の操作履歴を出力結果 (I) として示す。16:30 頃に製品替え終了、プロセスの安定を待って 17:20 に制御テストを開始、抄速 822 m, 抄造品の坪量 59.2 g, 古紙配合率 65%, 灰分 23% の品種であった。その時、WW 灰分濃度が 0.4% 程度と、この時の管理値 0.3% を超えていたため自動モードで歩留向上剤の添加率を 3 回に渡って徐々に増添して行った。これにより最終添加率は 3 回目で添加上限の 0.045% に達し、当初、30% 前後であった灰分歩留りは時間遅れを伴いながら約 6% 上昇、最終的に WW 灰分濃度も 0.35% 程度に低下したものの管理値の 0.3% 以下に押さえられなかった。尚、一段階目の薬品増添幅 +0.001% では WW 灰分濃度に余り変化が見られなかったため、2 段階目から自動

増減添幅の設定を2倍に拡大している。

しかし、本テストにおいてカールの問題が発生した。製品巻取りに発生したカールをリール枠毎に測定した結果を図10に示す。制御テスト前から抄紙機操作側の紙端部でMWカール（machine direction wire side curl）傾向であったが、歩留向上剤の初回増添とほぼ同タイミングの時刻17:20辺りから、トータル歩留り、灰分歩留りにほとんど変化がないにも拘わらず、特に操作側のMWカールが大きく悪化、18:30頃か

らは紙幅中央部（全紙幅5m）、駆動側にもカールが広がった。この時、操業側はカールアクションとして、抄速ダウン（▲20m）、ドライヤーシリンダー蒸気の一部停止、J/W比（jet speed/wire speed ratio）ダウンの対策を取った。その後、19:20に次製品への抄替え時に薬品添加を通常値に戻した所、カールは元のレベルに戻った。この時のカール悪化原因として、例えば、歩留向上剤の増添によりワイヤー上に噴出された原料中の生成フロックが成長、この成長フロックが多

Fig.9 Control result (I).

Fig.10 Curl trouble (Machine direction Wire side).

Fig. 11 Control result (II).

く抱き込んでくる水分によりプレス脱水が悪化したのではないかと推定している。ワイヤーパート脱水、プレス搾水後のパルプマットの水分分布や成分分布が変化、続くドライヤーパートで加熱後の紙表裏の水分状態が変化したり不均一になることでカールが出易くなることがあるが原因は特定できなかった。尚、カール量は、現場で吊下げカール評価法により測定した。

7.2 自動制御テスト

次に、Kajaani 方式の制御ループに基づいて WW 全濃度を一定に保つ正規のアルゴリズムに組み換え、さらに、今回、考案した安定化判定のアルゴリズムを組み込んで実プラントでリテンション制御の出力を行なった。図 11 に出力結果 (II) として示す。時刻 12:05 に製品替え終了、13:00 にプロセス安定と判定し歩留制御を自動開始した。その後、次第に WW 全濃度が上昇、15:40 頃に許容範囲を逸脱したが、歩留制御による歩留向上剤の増添動作で 16:45 頃には WW 全濃度を前の安定水準まで自動的に戻すことができた。今迄、このような場合、WW 濃度高目のまま操業を続けることが多かった。以後、この歩留制御を実操業で何回か実行しているが、この時を含め、問題となるような制御アクションによるカール発生は見られなかった。

8. ま と め

品種替えが頻繁に行なわれ目標濃度が決めにくい多品種生産の抄紙機に対して、Kajaani 方式のワイヤーパートのリテンション制御を適用した。諸事情により本機能の実運用期間は半年程度 (1993 年～1994 年) で、さらに運用確認が必要と考えるが、品種替え後の安定

した白水濃度を目標値とする方法を新しく工夫して付加することにより、連続操業の中で自動モードでリテンション制御を行なって行ける見通しを得た。尚、本制御により操業の安定化が期待できると共に、WW 濃度変動の分散幅の減少により歩留向上剤の添加率を 10% 削減できれば年間 2,500 千円程の薬品コスト削減メリットが期待できると試算され、モニタリング機能としての利用法にとどめない低濃度計システムの有効活用が期待される。尚、歩留向上剤添加率の過度の変更により製品にカール発生や地合の変化を引き起こす場合もあるようなため実行には注意が必要であると思う。最後に、本取り組みに当たり協力と多くの助言をいただいた、現 Metso Automation の牧秀一郎氏に紙面を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 森, 山田, 水野, 飯尾: 多品種生産に対応した抄紙機ワイヤーパートのリテンション制御, 計測自動制御学会 SICE 2000 学術講演会, 7 月 (2000).
- 2) 森, 加来, 末田, 飯尾, 水野, 山田: 多品種生産に対応した抄紙機ワイヤーパートのリテンション制御, 第 68 回紙パルプ研究発表会, 6 月 (2001).
- 3) Kortelainen, Nokelainen et al.: 上質工場における最新のリテンションモニタリングシステムの適用 43 紙パ技協誌 43-7 (1989).
- 4) 例えば, Jukka Nokelainen, Timo Rantala, Pasi Tarhonen: Practical experiences of the wet end consistency control, Pira, 1 (1992). Artama, Nokelainen: Control of retention and ash, Paper Technology, 10 (1997) など.
- 5) Green, Strong: On-line retention monitoring and

- control at Robert Flecher : Paper Technology 6 (1999).
- 6) 森, 山田ら (王子製紙) : 抄紙機のワイヤーパートの濾過白水濃度の自動制御方法とその装置ならびに濾過白水の目標濃度の設定方法, 特許出願第 133670 号 (1997).
- 7) 中川東一郎 : プロセスモデリングと多機能制御, 工業技術社 (1999).
- 8) 加来 : 歩留向上剤添加率制御テスト結果, 王子製紙社内資料 (春日井工場), (1993).
- 9) 加来 : 白水濃度と粕穴の関係調査, 王子製紙社内資料 (春日井工場), (1993).
-