短 周 期 坪 量 変 動 の 解 析

日本製紙㈱中央研究所 宮 西 孝 則

Analysis of Short-term Basis Weight Variation

Takanori Miyanishi

Central Research Laboratory of Nippon Paper Industries

The technology to analyze the short-term basis weight variation and the long-term variation of relevant paper machine process variables was developed. A number of measured data were stored in a database for several weeks. By the proper interpretation of accumulated data, it was found that the paper quality problem derived from the interaction of short-term and long-term process variation. The developed system quickly identified the causes of the problem and appropriate corrective action was taken to eliminate the bottlenecks in optimum paper machine operation.

Keywords : Paper machine, Spectrum analysis, Data base, Process analysis

1. は じ め に

1.1 アプローチ配管系の脈動、振動と短周期坪量変動との関係

パルプ懸濁液が抄紙機のワイヤー上で脱水され、繊維がネットワークを形成することによって紙層は作られる。均一な紙層を形成するためには流体のマイクロタービュレンスによって繊維はランダムに分散していなければならない。しかしアプローチ配管系に圧力脈動、機械振動が発生していれば、ヘッドボックス内部のパルプ懸濁液に流体力として伝播し、流体力の特定の周期変動に対応して、ヘッドボックス内の繊維ネットワークの濃度も周期変動を起こすことがある。すなわちヘッドボックス濃度の周期変動によって、パルプ濃度が高い箇所では坪量が高く、パルプ濃度が低い箇所では坪量が低くなる。この短周期坪量変動が極端な場合は紙にパーマークが現れる。

パルプ濃度の局所的な不均一性はパルプ懸濁液の凝集、あるいは分散によって生じる。流体力とコロイド化学の他に樹種、繊維長、繊維のフレキシビリティな

どの繊維の性質そのものも繊維の凝集、分散に大きな影響を及ぼす。例えば、長繊維は短繊維よりもフロック化しやすく、特にその傾向は高濃度で著しく、圧力脈動、機械振動などがあると短周期坪量変動が発生しやすい。

1.2 紙物性研究の時間領域

図1は紙物性の研究対象と測定装置をミクロな視点からマクロな視点へと整理して概念的に表したものである。1番目の欄は研究対象の大きさを示し、ミクロンからミリメートル、メートル、キロメートルまで対数目盛りで目盛っている。2番目の欄は研究対象である。紙を構成する最少単位はセルロース分子で、セルロース分子が集合したマイクロフィブリルが集まって繊維になり、繊維が集合して紙になる。ミクロな分子レベルからマクロな操業分野まで、これらの研究領域は科学者や技術者によって殆ど網羅されているように思える。例えばミクロンからミリメートルの領域は木材化学、紙物性で詳しく研究されているし、数10キロメートルの領域では、実機の抄紙機で紙品質の流れ方向変動をBM計(Basis weight & Moisture gauge)などの様々なオンラインセンサーで連続的にモニタリングされコントロールされている。

しかし、これらの時間領域のうち2つの領域だけが充分解析されていない。その1つの領域は長周期変動

本報は1992 Pan-Pacific Pulp & Paper Technology Conference (1992年9月8日~10日、於東京)で発表した。

Length	Object	Tool	Time (Speed = 1,200 m/min)
	?	<u>Engineering</u>	Months
10^6		* Data base	Days
10^4	Basis weight gauge	Process	Hours
(km)	(Uniform)	control	
10^2			
1 m	?	* Spectrum analysis	Seconds (1 Hz-100 Hz)
10^{-2}	Sheet formation	<u>Science</u>	
(mm)	(Random)	Paper	
10^{-4}		physics	
	Single fiber		
10^{-6}		Wood	
(μ)	Cellulose polymer	chemistry	

Fig. 1 MD variation of paper qualities

領域で、変動周期は極めて長く、数週間から数カ月間データを収集しなければ観察できない変動である。例えば抄速 1,000 m/min の抄紙機は 10 日間で 14,400 km の長さの紙を生産する。プロセス制御の分野では現時点で生産している製品のみが重要であって、一旦製品が抄紙機で生産され工場から出荷されてしまえば、もはや出来てしまった製品の品質コントロールはできないから、プロセスデータは不要になる。そのため抄紙機のプロセスコンピューターは通常 1 日から 2 日分だけデータを保存し、古いデータは次々に新しいデータで更新されていく。1 日から 2 日分だけのプロセスコンピューターのデータベースからは長周期変動を抽出できない。

もう 1 つの調査されていない領域は 1 ヘルツから 100 ヘルツまでの短周期変動領域である。BM 計は放射線源を使用しているのでセンサーの応答は遅く、この周波数領域の坪量変動を捕らえることはできない¹⁾。抄紙機械メーカーはアプローチ配管系統の圧力脈動、機械振動を解析する技術サービスチームを持ち、製紙工場の依頼により設備診断を行う。しかし、坪量の短周期変動を測定する技術はないので製紙工場が坪量の短周期変動をマニュアルで測定する。坪量の短周期変動測定の手順は、まず流れ方向に 10 cm ずつ数 100 カ所の紙をサンプリングして 1 サンプルずつ坪量を測定し、測定した坪量の時系列データをフーリエ解析して、固有周波数を抽出する。次にアプローチ配管系統の圧力脈動、機械振動のスペクトルと坪量のスペクトルを

比較して、一致するスペクトルを選び出し、坪量変動の原因となる装置を選び出し対策を講じる。それには大変な時間と労力を要する。

1.3 短周期坪量変動測定の問題点

我が国の紙の品質管理レベルは極めて高度であり、実際には定常的な品質問題は殆どないと言って良く、もしあるとしても、残っているのはまれにしか発生しない種類のものである。短周期坪量変動についても同様で、常時発生している場合は設備の圧力脈動と機械振動、紙の短周期変動だけを測定して比較すれば良いが、その様な単純な短周期坪量変動問題は殆ど解決済であろう。紙品質の一層の向上のためには、発生頻度の極めて小さい問題に取り組む必要がある。

短周期坪量変動が発生し、解析の準備を整えた頃には消滅し、そして又、何週間か経った後、再び発生することがある。それはおそらく、短周期坪量変動が何か別のプロセスの長周期変動の影響によって、増幅されたり減衰されたりしているのが原因ではないかと推定される。プロセスの変動は、単独ではなく 2 つの或いはそれ以上の複数の変動要因が干渉しあって問題解決を困難にしていると思われる。もしこの仮説が正しいとすれば、全ての時間領域の変動を測定できる工程解析システムを構築すれば、抄紙機のトラブルシューティングに威力を発揮する筈である。特に図 1 で示した解析されていない 2 つの領域に問題解決の鍵が潜んでいる可能性がある。

ところで膨大な数の紙をサンプリングしてラボに持

ち込み、人手で測定する方法は時間がかかるので、何度も頻繁に短周期坪量変動を測定することはできない。アプローチ配管系についても、どの様な条件下で問題が何時発生するのか予測がつかないので、製紙機械メーカーに設備診断の日取りを予約しておいても無駄になる可能性がある。解析システムを自社開発して設置し、長期にわたって連続してデータを取り続けて、品質問題発生時点でのデータを解析することによって原因が解明できると思われる。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の機能を持った統合的解析システムを構築し、実際の効果をあげることである。

- (1) 1ヘルツから100ヘルツの周波数の坪量変動、圧力脈動、機械振動を計測する。
- (2) フリーネス、pH、ファーストパスリテンション、紙水分、ヘッドボックス圧力、スクリーン圧力、クーチ真空度、ドライヤー温度など坪量変動に影響があると思われる長周期変動データを3分間隔で収集する。
- (3) これらの短周期データと長周期データを数か月保存できるデータベースを構築する。
- (4) 蓄積したデータを正しく解釈することによって、問題の原因を同定し、最適操業の支障になっている障害を除去するための対策を立案する。
- (5) 一旦問題が解決すれば、解析システムは調査が終了した抄紙機はもはや不要になるので、解析システムは必要な別の抄紙機に移設する。コストパフォーマンスが優れていること、様々な問題に対して柔軟に対応できることから、ポータブルの方が設置型よりも目的に適っている。

3. 解析事例

3.1 紙品質問題

ある工場の抄紙機の紙端で時折、数10 cm間隔で皺が発生することがあった。抄速が600 m/minから650 m/minなので、周波数を計算すると数10 Hzの短周期になった。当初、紙の乾燥が不均一なことが原因ではないかと推定されたが、ドライヤーの熱容量から判断して、乾燥条件が短周期で変動する筈がなく、ドライヤーを調べても異常箇所は見えなかった。一方、乾燥条件が一定であれば紙の水分は坪量と関連する。短時間では乾燥条件は一定と見なされるので、もし短周期坪量変動が存在すれば、坪量変動に応じて紙水分も変動する。紙水分が変動すれば紙収縮率も変動し皺が発生するのではないかと推測された。そこで製

紙機械メーカーに依頼してアプローチ配管系の圧力脈動と機械振動を測定したが、測定期間中、紙に皺は発生せず皺の発生原因は掴めなかった。そこで自社開発したシステムで調査を行うことになった。

3.2 抄紙設備

抄紙機は217インチの長網抄紙機で、ハイドロリックヘッドボックスが付いていた。抄速は600 m/minから650 m/min、坪量は51 g/m²から85 g/m²であった。3%濃度の種箱原料の流量は斤量弁でコントロールされ、サイロ白水で約1%に希釈されてファンポンプを経由し、スクリーンで除塵され、ストリームフローバルブを経てヘッドボックスに供給される。バルブ原料はヘッドボックスからワイヤー上に噴出される。ヘッドボックス圧力はファンポンプ回転数とストリームフローバルブ開度でコントロールされている。ヘッドボックスの幅方向の圧力プロファイルをコントロールするため、一部の原料はヘッドボックスのサイドからブリードオフされファンポンプのサクションに循環する(図2)。

3.3 解析手順

3.3.1 短周期変動解析

短周期坪量変動解析のために、抄紙機のリール直前に光学センサーを設置した。坪量の幅方向プロファイルが流れ方向の変動に影響を与えないように、センサーは紙のエッジに固定し定点測定を行った。光学センサーは非接触型で、紙を挟んで上下の発光部と受光部とからなっており、坪量変動に伴う紙の透過光の光量変化を光素子で電圧変化に変換する。電圧信号は高速フーリエ変換装置(FFTアナライザー)に入力して流れ方向変動の周期成分を抽出する。スペクトルの計算結果は5分間毎にFFTアナライザー付属のフロッピーディスクに保存し、必要に応じてプロッターに3次元グラフとして出力する。

Fig. 2 Approach flow system of a papermachine

3.3.2 長周期変動解析

ウエットエンドの挙動を解明するために構築したオンライン解析システムを利用して^{2,3)}、抄紙機各部の圧力、濃度、流量、温度、バルブ開度などのセンサーのアナログ信号をA/D変換器でデジタル信号に変換し、3分間隔で数カ月に渡ってパーソナルコンピュータに取り込み、長周期変動解析のためのデータベースを作った。オンラインデータの他に配合パルプ原料、インレット原料、白水などは4時間毎にサンプリングしてラボでバルブ濃度、ゼータ電位、繊維長などを測定し、パーソナルコンピュータに入力してオンラインデータと同じデータベースに保存した。パーソナルコンピュータではグラフ化及び簡単な統計処理を行った。パーソナルコンピュータのファイルは、必要に応じてローカルエリアネットワークを介して中央研究所のVAXミニコンピュータにファイル転送した。VAXには高度な統計処理を行うためのSASTM、ソフトウェア、及び信号処理を行うためのSIGTM、ソフトウェアを備えてある。

3.4 結果と考察

3.4.1 解析その1

皺問題を解決するために幾つかの調査を行った。まず予備調査として坪量スペクトルと、アプローチ配管系に設置されているポンプ、スクリーンなどの回転機器の固有周波数とを比較した。坪量スペクトルの主要なピークは4.75 Hz、13.25 Hz、24.75 Hzであった。坪量スペクトルの周波数には変化がなかったが、スペクトル強度は一定でなく、時間とともに強くなったり弱くなったりして変化していた。

モーターの回転数とベーンの数から計算した回転機器の固有周波数は20 Hz、47 Hz、84 Hzであり、坪量

のスペクトルとは一致せず、ポンプやスクリーンなどの脈動、振動が皺の原因ではなかった。

3.4.2 解析その2

流速を変更した時のヘッドボックスのヘッド圧力、ストリームフローバルブ開度、ボージェクトクリーナーのアクセプト圧力の変化を図3に示す。最初の日の16時に坪量を60 g/m²から70 g/m²に、抄速を620 m/minから610 m/minに変更した時、ヘッドボックス圧力をコントロールしているストリームフローバルブ開度は急速に44%から38%に閉まり紙に皺が発生した(図3, ANALYSIS 2の箇所参照)。

3.4.3 解析その3

坪量スペクトルの数日分を3次元グラフィックスで図4に表示した。X軸はスペクトル周波数で100 Hzが最大値である。Z軸がスペクトル強度でY軸は時間軸である。スペクトルは5分間隔で計算し表示した。坪量は一定に保持したまま、2日目の20:00に抄速を630 m/minから620 m/minに、続いて22:30に620 m/minから610 m/minに変更した。抄速はヘッドボックス圧力でコントロールしているので、ストリームフローバルブは51%から46%に急速に閉じられた(図3, ANALYSIS 3の箇所参照)。抄速が変更された時、坪量スペクトルの強度が増加し紙皺が発生した(図4, 20:00~24:00)。

3.4.4 解析その4

皺はいずれもストリームフローバルブが急激に閉まっている時に発生していることから、バルブが閉まった時にバルブの振動が増幅されて坪量の短周期変動を起こしていると推定された。そこで試しに3日目の9:00に循環弁を素早く60%から20%まで閉じてみると、ヘッドボックス圧力を保持するためにスト

Fig. 3 Stream flow valve opening, total head and pressure of centrifugal cleaner accept

Fig. 4 Basis weight spectrum at the machine speed change from 630 m/min to 610 m/min (analysis-3)

Fig. 5 Basis weight spectrum when the recirculation valve was closed from 60% to 20% (analysis-4) and when the rotation of a fan pump was increased from 840 rpm to 880 rpm (analysis-5)

リームフローバルブは45%から38%まで閉じられた(図3, ANALYSIS 4の箇所参照)。この時、坪量スペクトルの13.75 Hzのピークは上昇し紙に皺が発生した(図5, 9:00)。

抄速はヘッドボックス圧力の0.5乗に比例し、ヘッドボックス圧力はファンポンプ回転数で制御されるのが一般的である。しかしこの抄紙機では、ファンポンプ回転数を最低回転数にしてもヘッドボックス圧力は設定圧力よりも下がらず、抄速はある速度以下にはできないので、ストリームフローバルブの開度を絞らなければならなかった。ストリームフローバルブの開度を絞ると、ストリームフローバルブとボージェクト間の圧力が上昇し、アプローチ配管系の圧力脈動と機械振動がヘッドボックスに伝達されやすくなり、坪量の短周期変動によって紙の皺が発生するものと推定された。

3.4.5 解析その5

そこでファンポンプ回転数の影響を調査した。3日目の11:00にファンポンプ回転数を素早く一時的に840 rpmから880 rpmに増速すると、ヘッドボックス圧力を一定に保持するためストリームフローバルブは閉じ(図3, ANALYSIS 5の箇所参照)、坪量スペクトルは上昇して紙に皺が発生した(図5, 11:00~13:00)。

以上の解析結果からストリームフローバルブが急激に閉じる時に紙皺が発生することが確認できた。この結果は調査以前には全く予測できなかったものであった。

ストリームフローバルブの振動を測定したところ、振動周波数は11.75 Hzと24.5 Hzであり、坪量スペクトルの13.25 Hzと24.75 Hzとほぼ一致した。

3.4.6 解析その6

パーソナルコンピュータのスプレッドシート機能を

Fig. 6 Stream flow valve opening vs. total head

Fig. 7 Stream flow valve opening vs. vorticity accept pressure

使ってデータベースから任意の2変数を選択して、2変数の相関グラフと回帰係数を求めた。ストリームフローバルブ開度とヘッドボックスの全圧力の間には負の相関があり、抄速を下げるとストリームフローバルブが閉まることになった(図6)。

ストリームフローバルブ開度とボージェクトアクセプト圧力には正の相関関係があり、ストリームフローバルブが閉じるとストリームフローバルブとボージェクト間の圧力が上昇することが示された(図7)。

3.5 対策

調査結果に基づき下記の対策を講じた。

- (1) ファンポンプ回転数の最低回転数を更に低速に設定できるように改造した。
- (2) 当面の処置としてストリームフローバルブのサポートを強化し、最終的にはストリームフローバルブを除去した。
- (3) ボージェクト圧力を自動制御にして、アプローチ配管系の圧力が上昇しないようにした。
- (4) デキューレーターを設置し、アプローチ配管系の圧力脈動を吸収してヘッドボックスに伝播しないようにした。対策後、紙皺の発生は皆無となり操業は安定した。

4. 結 論

短周期変動と長周期変動を解析できる統合的解析システムを構築し、短周期データと長周期データをデータベースに数カ月保存した。蓄積したデータを解釈することによって問題の原因を素早く同定し、対策を立案して問題を解決することができた。

引用文献

- 1) Wochinger, L., A.: "Wet-end troubleshooting: pipeline pressure pulsation analysis and MD basis weight analysis", p. 311-325, 1985 Tappi Wet End Operations Seminar Notes
- 2) Paulapuro, H., Rita, R. and Valtonen, E.: Modern diagnostic techniques are the key to better performance. Pulp & Paper Canada. 90 (12): 21-29 (1989)
- 3) Miyanishi, T.: A new wet-end control system with on-line sensors. Tappi Journal 73 (7): 128-132 (1990)

(受理: '93.5.24)