長網抄紙機における坪量変動の要因分析 (1)

宇都宮大学工学部 村 田 正 男
 十条製紙株式会社 石 黒 久 三 郎
 宇都宮大学工学部 横 山 彰 治

Analysis of Basis Weight Variation in Fourdrinier Paper Machine (1)

Masao Murata

Faculty of Engineering, Utsunomiya University

Kyuzabro Ishiguro

Jujo Paper Co., Ltd.

Akiharu Yokoyama

Faculty of Engineering, Utsunomiya University.

In this report we investigated the factor of the sheet basis weight variation, which is one of the variation factors in paper manufacturing, and made theoretical study how to reduce it.

First of all, we theoretically testified that, in order to investigate the sheet basis weight variation factors, it is enough to know both stock flow rate variation factor under constant stock consistency and stock consistency variation factor under constant stock flow rate.

Secondly, we classified the paper manufacturing system concerning the basis weight variation on the actually operated machine into three types from the above mentioned point of view.

- (A) The case that both stock flow rate and consistency varies widely.
- (B) The case that stock consistency does not vary so much and only flow rate variation has effect to the basis weight variation.
- (C) The case that stock flow rate variation does not vary so much and only consistency variation has effect to the basis weight variation.

Thirdly, we investigated the transfer function of the paper manufacturing system in case of (B) and (C), calculated output amount by utilizing the simulation model, and analyzed the factors of the sheet basis weight variation.

The results are as follows :

- (1) In case of the test machine for the laboratory use which does not utilize the machine wire pit white water namely recovered white water, sheet basis weight variation is far smaller than the actually operated machine which utilizes recovered white water.
- (2) High speed machines can be classified into above (C)-type in view point of paper manufacturing system as stock flow rate into the stock inlet is strictly controlled as one counter-measure for stable operation.
- (3) In case of (C) type, even if the variation value of stock consistency into the stuff box is constant, sheet basis weight shows different response to the consistency variation, according to the main component of the stock or the point where clay is added.

1. はしがき

現在高速多量生産用の抄紙機としては、通常ツインワイヤ (twin wire) もしくは長網 (Fourdrinier) 型抄紙機が採用されている。これらの抄紙機ではその前工程である調成部門、および抄紙機を中心とした白水回収システムを含む抄紙諸条件の変動要因が多岐にわたり非常に複雑なため、この変動要因を総括し、総合的、系統的に調べることはきわめて困難な状況にあり、実際操業を対象としたこの種の研究はまだ十分行われていないのが現状である。

本文では抄紙に関する変動要因の主要素の一つである製品坪量変動に焦点を合せ、本変動要因が奈辺に起因し、これを改善するには如何なる方法が有効かを理論的に考察している。

まず抄紙原料中に含有される原料絶乾量に着目し、紙層構成部における坪量変動に関する抄紙システムを系統的に大別し、つぎの2系統に分類できることを理論的に立証した。

1. 原料流量変動系…抄紙原料の濃度は一定だが流量が変動する系。
2. 原料濃度変動系…抄紙原料の流量は一定だが濃度が変動する系。

したがって製品坪量変動の要因を解明するには、原料濃度を一定とした場合の流量変動要因と、原料流量

を一定とした場合の濃度変動要因とをそれぞれ明らかにすればよいことになり、それぞれの系に対し製品坪量変動の要因を追究することの必要性を強調した。

つぎに、実際に稼動している抄紙機における坪量変動に関する抄紙システムを、流量変動系および濃度変動系の観点から、つぎの三つのタイプに大別した。

1. 普通型…抄紙原料の流量および濃度がともに大きく変動し、抄紙システムが流量変動系と濃度変動系の二系統から成り立つとみなされる場合。
2. 流量型…抄紙原料の濃度変動による坪量変動への影響が無視でき、抄紙システムが流量変動系のみと考えられる場合。
3. 濃度型…抄紙原料の流量変動による坪量変動への影響が無視でき、抄紙システムが濃度変動系のみと考えられる場合。

さらに、これらのうち流量型および濃度型の抄紙機について、抄紙システムの伝達関数シュミレーションモデルによる出力算出を詳述し、あわせて製品坪量変動に対する要因を分析した。

2. ワイヤパートにおける抄紙特性

図1ならびに図2は、実際に稼動している多くの長網抄紙機における抄紙主要諸元を取纏めたものである。一般的にいて長網抄紙機ではストックインレットにおける原料濃度が低いほど良好な製品地合が得られ易

Fig. 1 An example of manufacturing scope

Fig. 2 An example of manufacturing scope

いが、ストックインレットにおける原料濃度は、製品坪量、抄速、原料フリーネス、填料の有無と多寡、製品の種類等に大きく支配され、したがって実験に移動している抄紙機の抄紙条件は、原料濃度のみを取り上げても多様性に富み一律ではない。

図3は同じく実際に移動している多くの長網抄紙機のワイヤ上における抄紙原料の歩留を示した一例である。本図で特に注目すべきことは、ケミカルパルプ(CP)を主として配合された原料の場合に、ストックインレット内抄紙用原料濃度と、ワイヤ下回収白水(back water)濃度とがほぼ比例しているのに対し、グランドパルプ(GP)を主として配合された原料の場合には、ストックインレット内原料濃度が変化してもワイヤ下白水濃度はほとんど変化せず、ほぼ一定とみなし得ることである。

要するにワイヤ下白水濃度の変動は、これが回収され原料希釈用白水として再使用される場合、抄紙機を中心とする抄紙プロセス全般にわたる絶乾原料のフローに大きく影響を与えるため、上記ワイヤ下回収白水濃度に関するCP、およびGPいずれかを主配合とする抄紙原料の相違は、前記抄紙システムを解析する上で重要な意味を有していることが解る。

図3によれば、同一抄紙機で抄造した場合、使用原料がCPを主として配合されたものか、GPを主として配合されたかにより、抄紙プロセスにおける絶乾原料フロー量が大きく変化する。その意味で本図は、それぞれ抄紙原料主配合の観点からシステム解析を行う必要性を示唆し重要である。

以下、抄紙工程に対する基本的な考え方について詳述してみよう。

3. 要因分析の基礎

3.1 ケミカルパルプ(CP)を主配合した抄紙原料の場合

図4において、実際操業のワイヤ上紙層より脱水された、いわゆるワイヤ下回収白水濃度は、図3に示す多くの結果より、 C_0K (K は抄紙原料により定まる定数)で与えられるため、上記ワイヤ上紙層より脱水されワイヤを通過落下する原料絶乾量、およびワイヤ上にそのまま残留する原料絶乾量はそれぞれ Q_0C_0K (ton/min), $Q_0C_0(1-K)$ (ton/min) で示され、一方、抄紙機ドライエンドにおける原料絶乾量 W_0 (g/m²) は次式で表わされる。

$$W_0 = \frac{1}{\text{width} \times V_W} Q_0 C_0 (1-K) \times 10^4 \quad \text{..... (1)}$$

ただし

width: 紙幅 (m)

V_W : 抄速 (m/min)

いま、かりに原料流量が $q_0(t)$ 、原料濃度が $c_0(t)$ 、製品坪量が $w(t)$ だけそれぞれ微小変化し

$$Q_0 \rightarrow Q_0 + q_0(t)$$

$$C_0 \rightarrow C_0 + c_0(t)$$

$$W_0 \rightarrow W_0 + w(t)$$

になったとすれば、 $w(t)$ は (1) 式より

$$w(t) \simeq \frac{1}{\text{width} \times V_W} \{q_0(t)C_0 + c_0(t)Q_0\} (1-K) \times 10^4$$

と表示され

$$\frac{w(t)}{W_0} \simeq \frac{q(t)}{Q_0} + \frac{c(t)}{C_0} \quad \text{..... (2)}$$

が成立する。

Fig. 3 The relation between stock inlet consistency and back water consistency

(2) 式の右辺第1項は、原料濃度を一定とした場合の流量変動、すなわち原料流量変動系を表わし、また第2項は、原料流量を一定とした場合の濃度変動、すなわち原料濃度変動系を示している。換言すれば製品の坪量変動は、ストックインレットから流出する抄紙原料の流量、ならびに濃度の変動に起因し、これらの変動要因を明らかにすれば、製品坪量変動の要因は解明されることになる。

3.2 グランドパルプ (GP) を主成分とした抄紙原料の場合

図5においてワイヤ上紙層より脱水されたワイヤ下回収白水の原料濃度は、ケミカルパルプ (CP) の場合とは異なり、ストックインレットにおける原料濃度変動にはほとんど関係なく、ほぼ一定値とみなし得るため、ワイヤ下白水内に含有される原料絶乾量、およびワイヤ上に残存する同じく原料絶乾量は、それぞれ $Q_0 K'$ 、 $Q_0 (C_0 - K')$ (K' は抄紙原料の種類により決まる定数) となり、抄紙機ドライエンドにおける原料絶乾量 W_0 は

$$W_0 = \frac{1}{\text{width} \times V_W} \times Q_0 (C_0 - K) \times 10^4 \quad \dots\dots (3)$$

と表わすことができる。

いま、原料流量、原料濃度ならびに製品坪量が抄紙工程における何等かの要因により微小変化し、その変化量をそれぞれ $q_0(t)$ 、 $c_0(t)$ 、 $w(t)$ とすれば $w(t)$ は

$$w(t) = \frac{1}{\text{width} \times V_W} \{q_0(t) (C_0 - K) + C_0(t) Q_0\} \times 10^4$$

と示すことができ次の (4) 式が成立する。

$$\frac{w(t)}{W_0} = \frac{q_0(t)}{Q_0} + \frac{c_0(t)}{C_0 - K} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式の場合も、(2) 式と同様、右辺の第1項は原料濃度を一定とした場合の流量変動、すなわち原料流量変動系を示し、第2項は原料流量を一定とした場合の濃度変動、すなわち原料濃度変動系を示している。

3.3 抄紙システムの分類

主として実験室で使用されるごく小規模のテストマシンは、実際に稼動している抄紙機のように、ワイヤ

Fig. 4 Flow diagram of stock bone dried volume in case that main component is chemical pulp

Fig. 5 Flow diagram of stock bone dried volume in case that main component is ground wood pulp

下回収白水で原料を希釈する種類のものでなく、あらかじめ一定量のパルプ及び填料を清水で希釈し、これをタンク内に貯蔵し、これより本希釈原料が直接ヘッドボックス内に流入する構造になっている。したがって、この場合は原料流動変動系のみとみなしてよく、代表的な流量型と言うことができる。

一方、実際に稼動している高速抄紙機では、普通操業安定対策上ストックインレットよりの原料流量調節が厳密に行われ、したがって流量変動による製品坪量変化は殆ど無視してよいと考えられるため、高速抄紙機に対しては、紙層形成プロセスにおける抄紙システムを濃度型として解析するのが至当と考える。

表1は長網抄紙機における坪量変動に関する抄紙システムを大別し纏めたものである。

4. 抄紙システムが流量型の場合における坪量変動要因の検討

4.1 伝達関数とシミュレーション

Table 1 Classification of paper manufacturing system regarding the basis weight variation

Classification	Paper manufacturing system	Example of application	Remarks
Flow rate type	Consists of only flow rate variation system	Small test machine for laboratory use	
Consistency type	Consists of only consistency variation system	High speed machine	This type is usually used for the simulation model
General type	Consists of both flow rate variation system and consistency variation system	Medium and low speed machine	Almost all actually operated machines belong to this type

の場合に比べ、製品坪量変動ははるかに小さい。実験用小型抄紙機での流量調節は、いずれのマシンにも見られる程度の簡単なものであり、調節器等メータ類は一切つけられていないが、それにもかかわらず坪量変動が非常に小さいことは、坪量変動を大きく左右する要因が流量変動 $q_i(t)$ にあるのではなく、むしろ抄紙用原料の希釈水の挙動に起因していることを図 9 は示唆している。

5. 抄紙システムが濃度型の場合における変動要因の検討

5.1 伝達関数とシミュレーション

図 10 において、 C_i が $c_i(t)$ だけ微小変化して C_0 が $c_0(t)$ だけ変化したとすれば、 $c_i(t)$ と $c_0(t)$ の間には、仮にストックインレットを完全混合タンクとみなせばつぎの関係式が成立する³⁾。

$$c_i(t) - c_0(t) = \frac{AH_0}{Q_0} \frac{dc_0(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

A : 流出口の面積 (m^2)

Q : 流出量 (m^3/sec)

H_0 : スtockインレットにおける液面の高さ (m)

(8) 式の両辺をラプラス変換すれば次式となる。

$$C_i(s) - C_0(s) = \frac{AH_0}{Q_0} s C_0(s) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $C_i(s)$ 、 $C_0(s)$ はそれぞれ $c_i(t)$ 、 $c_0(t)$ のラプラス変換とする。

したがって、流量を一定とした場合の濃度変動に対するストックインレットの伝達関数 $C_0(s)/C_i(s)$ は

$$\frac{C_0(s)}{C_i(s)} = \frac{1}{1 + (AH_0/Q_0)s} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

既述したように、グランドパルプ (GP) を主配合とした抄紙原料の場合には、ストックインレット内原料濃度が変化してもワイヤ下回収白水濃度は変らない。したがって、この場合の抄紙システムの伝達関数は図 11 のようになる。

これに対してケミカルパルプ (CP) を主配合とした抄紙原料は、どちらかというと上質紙を中心とした高級紙の抄造に用いられる場合が多く、そのため同原料中には製品品質面における諸要求を満たすため各種填料が流加される場合が多い。一方、ケミカルパルプ (CP) に含まれる原料繊維の長さは、グランドパルプ (GP) に含まれる原料繊維のそれにくらべ大であり、これよりワイヤ上原料繊維の歩留は CP の方が GP に比し良好と考えられ、したがって CP を主配合とした

Fig. 9 An example of basis weight variation on the small machine for laboratory use

Fig. 10 The transfer function against consistency of stock suspension in the stock inlet

Fig. 11 The transfer function of consistency variation system in case that main component is ground wood pulp

場合、ワイヤ回収白水中に含有される固型分は、原料に含有されている微細繊維、およびこれに加え填料がその主要成分をなしていると考えて差支えない。

以上よりストックインレット濃度が微小変動すれば、これに比例してワイヤ下回収白水濃度も変化するの、主として填料による影響と考えられ、抄紙工程においてどこで填料が添加されるかが抄紙システムを解析す

る上で重要な意味をもってくる。

図 12 および図 13 はケミカルパルプ (CP) を主配合とした抄紙原料の場合における抄紙システムの伝達関数を示したもので、両図に示したようにどこで填料が添加されるかにより伝達関数は異ってくる。

図 14 は各系の出力を計算機で算出したもので、本図によればケミカルパルプ (CP) を主配合とする抄紙原料と、グラインドパルプ (GP) を主配合とする抄紙原料の場合とでは、抄紙機前工程に設置される、いわゆる種箱における濃度変動が同一であっても、それに対応する坪量変動は異なり、特に種箱流入原料に填料が添加される場合、最終値に達するまでの応答時間は他の場合に比べ、はるかに長くなっている。

5.2 実験例

図 15 は種箱流入原料における濃度変動の自己相関関数と、製品坪量変動の自己相関関数とを比較したものである。

同図によれば、両変動に含まれる変動周期成分のかなりの部分がよく一致し、坪量変動の要因として、種箱流入原料の濃度変動を第一にあげることができよう。このほか種箱流入原料の流量変動、いわゆる第一循環系における白水の濃度変動、同白水の流量変動等を、製品坪量変動の要因としてあげることができよう。これらのうち、第一循環系白水の濃度変動は、主としてストックインレットにおける抄紙原料の濃度変動に起因するものであり、また上記白水の流量変動は、抄紙システム全体の流量をも大きく影響を与える要因となるので、一般型の抄紙システムとして後日詳述する予定である。

つぎに種箱流入原料の流量 Q_i の影響について検討してみると、ストックインレット濃度を $(C_i Q_i + C_i' Q_i') / (Q_i + Q_i')$ (ただし、 C_i : 種箱流入原料の濃度、 Q_i : 種箱流入原料の流量、 C_i' : 一次循環系白水の濃度、 Q_i' : 同白水の流量) とし、 $c_i = 3\%$ 、 $C_i' = 0.15\%$ 、 $Q_i : Q_i' = 1 : 18$ とすれば、種箱流入原料の流量が 10% 変ると、ストックインレット濃度は 5% も変動するのに対し、ストックインレットの流量は 0.5% しか変動しない。したがって、種箱流入原料の流量変動は、抄紙システム全体の流量変動の要因とはなり得ず、流量変動としてよりむしろ種箱流入原料の濃度変動として取り扱う方が妥当と言えよう。

図 16 は種箱流入原料の流量変化に対する坪量の変動状態を示す一例であり、同図は種箱流入原料の流量変動が坪量変動を大きく左右する要因であることをよく実証している。

Fig. 12 The transfer function of consistency variation system in case that main component is chemical-pulp (No. 1)

Fig. 13 The transfer function of consistency variation system in case that main component is chemical pulp (No. 2)

6. むすび

以上を纏めてみると次のようになる。

(1) 抄紙システムを三つのタイプに分類し、それぞれのタイプについて製品坪量の変動要因を分析することが、ツインワイヤもしくは長網抄紙機の製品坪量変動に対する最も妥当な要因究明法となることを理論的に立証した。

Fig. 14 An example of calculation (In case that consistency varies)

Fig. 15 Auto correlation function regarding the basis weight variation and the consistency variation of stock into the stuff box

(2) 抄紙機のワイヤ下白水すなわち回収白水を利用しない実験室用のテストマシンでは、回収白水を再利用する実際に稼動している抄紙機の場合にくらべ、製品坪量変動は非常に小さい。

(3) 高速抄紙機では、操業安定対策の一つとしてストックインレットに流入する抄紙原料に対する流量調節が厳密に行われるので、抄紙システムに対しては、原料濃度変動系のみとみなして差し支えない。

Fig. 16 An example of basis weight variation against the flow rate variation of the stock into the stuff box

(4) 原料濃度変動系のための抄紙システム、すなわち濃度型の抄紙システムでは、この抄紙原料がケミカルパルプ (CP) を主配合としているか、グランドパルプ (GP) を主配合としているかにより、また、どこで填料を添加するかによって、いわゆる種箱に流入する原料の濃度変動が同一であっても、それに対応する製品坪量変動状態は非常に異なる。

終りに臨み、本研究を進めるにあたりご指導ご鞭撻を賜りました東京大学農学部教授門屋 卓博士に心より感謝の意を表します。また本研究に関し、種々ご討論を賜りました紙パルプ技術協会自動化委員会委員各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) たとえば水上憲夫 自動制御 p. 48 朝倉書店 (昭和 43 年)
- 2) 同 上 p. 138
- 3) たとえば城塚正外 2 名 移動速度論 p. 299 オーム社 (昭和 41 年)