抄紙機における湿紙乾燥メカニズムの解析 (第2報) —乾燥メカニズムの数式化とその評価—

石川島播磨重工業株式会社産業機械事業部

製紙機械技術部 武 田 剛 一

開 発 部 矢 ケ 部 政 宏

Analysis of Drying Mechanism on Paper Machine 2nd Report

Formulation and Estimation of a Wet Sheet Drying Mechanism

Gōichi Takeda and Masahiro Yakabe

Industrial Machinery Division, Ishikawajima-Harima-Heavy-Industries. Co., Ltd.

In the 1st report, the drying model of a wet sheet and the formulation of drying speed, expressed as a function in the drying factor, have been discussed on a multi-cylinder dryer section. For the practical use of the drying model, three items are studied.

1. From the experimental result of canvas drying in a laboratory scale, a simplified formula, delivering variations in water contents of a canvas, is obtained by a vapour removal roll.
2. The pocket's moist condition is determined more accurately by solving the equation of heat and mass equilibrium.
3. It is proved that in a comparison between the computed value and the data in an operating condition, the drying model is available for actual simulation of water contents and of temperature distribution in a wet sheet and canvas.

1. 緒 言

抄紙機の多筒式ドライヤにおける湿紙乾燥モデルと乾燥要素を変数とした乾燥速度の数式化について第1報¹⁾に報告した。このたび、著者らは数式モデルを実用化するためカンバスの乾燥実験を行ない、V.R. ロールから噴射される水分量の簡略式を導入し、その簡略式と前報のフリーランにおける湿紙の蒸発量の式を用いて V.R. ロールのある時とない時のポケット雰囲気の平衡状態の計算式を導き、プログラムの中でポケット雰囲気を計算させることを可能としたので、ここに報告する。さらに、実機におけるデータを収集、解析し、湿紙水分率及び温度、カンバス温度などについて数式モデルを使用した計算値と比較したのであわせて記述し、参考の一助に供したい。

2. カンバスの通風乾燥

このたびの実験により各種カンバスの乾燥特性及び物質移動容量係数 (K_d) を得たので、簡略式を導入することにより V.R. ロール (熱風噴射ロール) により

ドライヤポケット内へ吹き出すカンバス水分量を容易に計算することができるようになった。

2.1. 通風乾燥理論

ドライヤポケットの構成を第1図に示す。カンバスがかかっている小ロールの所に V.R. ロールが設置されている。多くの実験、実機データの計測の結果、つぎの仮定をおくことができる。

- (1) カンバスに対してパルスの通風乾燥が行なわれる

第1図 ドライヤポケットの構成
Fig. 1 Layout of dryer pockets

ことを考えれば, V. R. ロール出・入口のカンバスの含水率の変化は少ないと考えられるので, 通風乾燥時の物質移動容量係数と湿度推進力は一定とすることができる。

- (2) (1)から, 乾燥状態が恒率であるか否かとは無関係に V. R. ロール入口のカンバス含水率に応じた物質移動容量係数と湿度推進力を用いると, 恒率乾燥の式により V. R. ロールにより除去されるすべての水分量を容易に求めることができる。

ここで, 物質移動容量係数とは一定時間に一定体積を通過する乾き空気の重量で, 湿度推進力はカンバスの表裏間の絶対湿度の差をあらわす。

乾燥理論のモデルを第2図に示す。平岡²⁾らによって導かれる恒率乾燥理論を V. R. ロール用に適用すると, つぎの関係がある。今, 密度 (ρ_c) (kg/m^3), 高さ (L) (m), 物質移動容量係数 (K_a) ($\text{kg}'/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) のカンバスに G_0 ($\text{kg}'/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) の空気 (絶対湿度 (x_a) (kg/kg')) を通過させたとき, カンバスから吹き出される単位時間のカンバス中の水分の変化量 (W_1) ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) は次式により表わされる。

- (注) x_a : 供給空気の絶対湿度 (kg/kg')
 ρ_c : カンバス密度 (kg/m^3)
 H : 湿度推進力 (kg/kg')
 K_a : 物質移動容量の係数 ($\text{kg} \cdot \text{ドライエ}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$)
 L : カンバス高さ (m)
 G_0 : 空気重量 ($\text{kg} \cdot \text{ドライエ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
 c : 粒子の含水率 ($\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{ドライカンバス}$)

第2図 通気乾燥モデル

Fig. 2 Model of through drying theory

$$W_1 = \int -\rho_c \cdot (\partial c / \partial \theta) \cdot dz \quad (1)$$

通過した空気がカンバスからもち去る水分量 (W_2) ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) は

$$W_2 = \int G_0 \cdot (\partial H / \partial z) \cdot dz \quad (2)$$

また, カンバスの出・入口の水分量差 (W_3) ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) は次式により示される。

$$W_3 = \int K_a \cdot H \cdot dz \quad (3)$$

z : カンバス厚さ方向距離 (m)

θ : 時間 (h)

H : 湿度推進力 (kg/kg')

c : カンバスの粒子ごとの含水率 ($\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{ドライカンバス}$)

カンバスにおける水分の減少は, 空気水分の増加量, カンバス出・入口の水分含有量の差にそれぞれ等しいため, (1)~(3)式はつぎのようになる。

$$-\rho_c \cdot (\partial c / \partial \theta) = K_a \cdot H \quad (4)$$

$$-\rho_c \cdot (\partial c / \partial \theta) = G_0 \cdot (\partial H / \partial z) \quad (5)$$

これらを無次元化するため t, ζ, ϕ を導入すると次式を得る。

$$t = K_a \cdot \theta / \rho_c \cdot cs \quad (6)$$

$$\zeta = K_a \cdot z / G_0 \quad (7)$$

$$\phi = c / cs \quad (8)$$

cs : 標準含水率 ($\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{ドライカンバス}$)

(4), (5)式に(6)~(8)式を導入することにより, つぎの基本式を得ることができる。

$$(\partial \phi / \partial t) = -H \quad (9)$$

$$(\partial \phi / \partial t) = (\partial H / \partial \zeta) \quad (10)$$

(9), (10)式を組み合わせて解くと次式となる。

$$H = H_0 e^{-\zeta} \quad (11)$$

H_0 : カンバスの入口含水率に対応する湿度推進力 ($\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{kg}'$)

層全体の乾燥速度は, (11)式を(9)式に代入し $0 \leq \zeta \leq \xi_L$ で積分することにより容易に求めることができる。

$$(-dw/d\theta) = G_0 \cdot H_0 \cdot (1 - e^{-(K_a/G_0) \cdot L}) / \rho_c \cdot L \quad (12)$$

w : カンバス含水率 ($\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{ドライカンバス}$)

ゆえに, (12)式からカンバス通風時の乾燥速度を求めることができるので, 湿度推進力 (H) と物質移動容量係数 (K_a) をカンバス含水率の関数として実験により求めることにより, V. R. ロールによる水分の吹出量を求めることができる。 $d\theta$ 間にカンバスにより出る水分量 (W_V) (kg) は次式により表わされる。

$$W_V = (-dw/d\theta) \cdot d\theta \cdot \rho_c \cdot L \cdot A \quad (13)$$

A : 通風面積 (m^2)

2.2 実験装置および実験方法

2.2.1 実験装置

実験装置の配置を第3図に示した。送風機からの空気はダンパを通して電熱式ヒータに入り, 加湿された試料を通過したのち大気へ放出される。この間に加湿された試料は乾燥される。この重量変化により, カンバスの通風乾燥による乾燥曲線を作成した。

実験装置に使用した各機器は次の通りである (第3図を参照)。送風機はターボ送風機 (風量: $100\text{m}^3/\text{h}$)

第3図 実験装置の配置

Fig. 3 Test plant arrangement

min, 静圧: 300 mmAq) で, 手動式ダンパにより風量をコントロールされる。ヒータは電熱式ヒータで, 50~300°C 間をサーミスタにより $\pm 5^\circ\text{C}$ にコントロールされる。指示記録計により温度の測定を行なった。測定点は, ヒータ前後及び試料自身の温度を測るため, カンバス中に熱電対を埋めこんだ場所である。

試料は 150 口のアルミ製のわくにはめこまれており, カンバス品種は綿, プラスチック及びアスベストカンバスを約 24 時間, 80°C の温水に浸したのち, 3 時間放置したものである。試料入口はダクトにスリットが切られており, 試料アルミわくを短時間で出入することができる。所定時間後, 試料の重量変化を読みとることができるよう, 計量器には精密天秤を用いた。また, 試料前後の圧力差を読みとるため, 微圧計を用いた。試料の重量を測ることによっても蒸発水分を知ることができるが, 乾・湿球の温度により試料から蒸発ないし吹き出した水分を求めるため乾湿球温度計を用いた。さらに, 熱線式風速計により風速を求め, 風量を測定した。

2.2.2 実験方法

上述した各試料について選定した風量を得ることができるようダンパにより風量をコントロールしたのち, 投入口から重量測定後の試料を入れ, 所定時間後, 取り出して再度重量を測定し, 重量絶対値の変化がみられなくなるまでこのサイクルを繰り返す。これらの 1 サイクルの間に, ヒータの前後及び試料内に入れられた熱電対により各点の温度を, また, 圧力指示計により試料前後の圧力差を測定し, 試料通過後の空気の乾・湿球温度及び風速を記録した。これらにより, 各種カンバスの通風乾燥による重量変化曲線, 湿度推進力及び物質移動容量係数を求めた。

2.3 実験結果

綿, プラスチック及びアスベストについて実験を行なったが, 操業含水率がもっとも大きいと思われる綿カンバスについてその結果を報告する。ここで, 空気

温度は 100~150°C, 空気重量は $1,400 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ とする。

2.3.1 カンバスの重量変化 (第4図)

3 分 30 秒までを加熱ゾーン, 3 分 30 秒からの 6 分 45 秒までを恒率乾燥ゾーン, 6 分 45 秒以降を減率乾燥ゾーンとみなす。

2.3.2 湿度推進力

乾・湿球温度を測定することにより求めた絶対湿度を縦軸に, 時間を横軸にとった湿度推進力の変化を第 5 図に示した。当然のことながら, 第 4 図は第 5 図と非常によく対応した関係にあることがわかる。厳密にいうと,

湿度推進力 =

$$[\text{計測される絶対湿度}] - [\text{大気絶対湿度}]$$

と表わすことができる。

(注) カンバス品種: 綿カンバス
空気温度: 100~150°C
空気重量: $1,400 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$
坪量: $2,240 \text{ g/m}^2$

第4図 カンバスの重量変化

Fig. 4 Weight change of canvas

第5図 湿度推進力-乾燥時間の関係

Fig. 5 Relation between drying power and drying time

2.3.3 カンバスの温度変化

通風時の綿カンバスの温度変化を空気温度が 130~140°C の場合と 120°C の場合について第 6 図に示した。温度が高い場合, 初期加熱後 (30 秒後) の温度勾配は低温の場合よりもゆるやかであることから, 高温

ほど有利な蒸発ができると考えられる。

2.3.4 カンバス中の含水率と無次元湿度推進力の関係

縦軸に無次元湿度推進力, 横軸にカンバス含水率をとり, 第5図から恒率乾燥における湿度推進力 (H_c) を $0.011 \text{ kg-H}_2\text{O/kg'}$ にとってプロットしたものを第7図に示した。同図から, 任意の含水率における湿度推進力を求めることができる。

第6図 綿カンバスの温度変化

Fig. 6 Temperature change of cotton canvas

第7図 カンバス中の含水率—無次元湿度推進力の関係

Fig. 7 Relationship between the moisture contents of a canvas and its drying power

2.3.5 物質移動容量係数

物質移動容量係数と含水率の関係を第8図に示した。 K_a は, (12式) から容易に導かれる。すなわち

$$K_a = G_0 \cdot l_n \{ 1 / (1 - \rho_c \cdot L \cdot (-dw/d\theta)) / (G_0 \cdot H_0) \} / L \quad (14)$$

カンバス含水率がさがるにつれて K_a もさがり, また, プラスチックカンバスの K_a は綿カンバスのそれよりも大きい (第8図)。

第8図 物質移動容量係数—カンバス含水率の関係

Fig. 8 Relationship between mass transfer coefficient and the moisture contents of the drying canvas

2.4 実験結果の応用

以上の実験結果を用いて, V. R. ロールによる蒸発量を求める計算例を以下に記す。計算に使用する値はつぎのとおりである。

カンバス品種	綿カンバス
" 厚さ	0.004 m
" 坪量	2,240 g/m²
空気重量	1,750 kg'/h·m²
通風乾燥距離	0.4 m
抄速	110 m/min
面長	2.90 m

カンバス含水率を $0.15 \text{ kg-H}_2\text{O/kg} \cdot \text{ドライカンバス}$ とすると, $K_a = 4.2 \times 10^4 \text{ kg'/h} \cdot \text{m}^2$ (第8図), 無次元湿度推進力 (H/H_c) は 0.445 (第7図) であるから, この含水率における湿度推進力 (H) は

$$H = 0.445 \times 10^{-2} \text{ kg-H}_2\text{O/kg'}$$

となる。他方, 計算しようとする空気重量と実験重量は異なるため, 平岡²⁾らの実験式を用いて

$$K_a = [\text{定数}] \times G_0^{0.8} \quad (15)$$

ゆえに, $G_0 = 1,750 \text{ kg'/h} \cdot \text{m}^2$ のときは

$$K_a = 5.02 \times 10^5 \text{ kg'/h} \cdot \text{m}^2$$

となる。この値を(12), (13)式に代入すると、単位時間あたりの水分量: 1.44 g/sec を得る。カンバス含水率と蒸発量の関係を第9図に示した。同図から、蒸発水分量はカンバスの含水率とほぼ比例して増加していることがわかる。

このように水分量を算出することにより、ポケット内の蒸発総量を正確につかむことができるようになった。

第9図 蒸発量—カンバス含水率の関係

Fig. 9 Relationship between evaporated water and the moisture contents of the canvas

第10図 ポケットのモデル図

Fig. 10 Model of dryer pocket

3. ドライヤポケット雰囲気条件の計算式

紙、カンバスからポケット内へ出てくる蒸発量を求めることができることから、これを用いてポケット内の条件を決定することができる。雰囲気条件を決定する式を第10図に示すモデルにより考える。同図中のABCD および EFHG 面は大気へ開放されていて、BCHF 面からは紙面からの蒸発水分がポケット内へ送入される。ABFE 面は、V. R. ロールのない場合は

壁で、V. R. ロールのある場合は V. R. ロールによるカンバス水分がポケットに送入される。ADGE, DCHG 面はいずれも壁面とする。今、ポケットが最終的におちつく条件を求めるため、ある状態にある空气中に BCHF 及び ABFE 面から蒸気が吹きこまれた場合、ポケットがどのような変化をするかを考える。

湿り空气に水又は蒸気を混合する場合の状態変化については、すでに研究されている。その基礎的な考え方を用いると、次式を得ることができる。

ポケット中の水分量の釣り合いから

$$-G_a \cdot x_1 + (G_a + G_{av}) \cdot x = G_p + G_v + G_{av} \cdot x_a \quad (16)$$

ポケット中のエンタルピの釣り合いから

$$\begin{aligned} -G_a \cdot i_1 + (G_a + G_{av}) \cdot i &= G_p \cdot i_p + G_v \cdot i_v \\ &+ G_{av} \cdot x_a \cdot i_v \quad (17) \end{aligned}$$

i_1 : 混合前の空气のエンタルピ (kcal/kg')

i : 混合後の空气のエンタルピ (")

i_p : 紙からの蒸気のエンタルピ (kcal/kg)

i_v : V. R. ロールからの蒸気のエンタルピ (")

G_a : 混合前の箱中の乾き空气の重量 (kg')

G_{av} : 混合する V. R. ロールからの乾き空气重量 (")

G_p : 紙からの蒸発量 (kg)

G_v : V. R. ロールからの蒸発量 (")

x_1 : 混合前の絶対湿度 (kg/kg')

x : 混合後の絶対湿度 (")

x_a : 大気の大気絶対湿度 (")

(16), (17)式をそれぞれ混合後の状態を求める式に変形すると

$$i = (G_p \cdot i_p + G_v \cdot i_v + G_{av} \cdot x_a \cdot i_v) / (G_a + G_{av}) + G_a \cdot i_1 / (G_a + G_{av}) \quad (18)$$

$$x = (G_p + G_v + G_{av} \cdot x_a) / (G_a + G_{av}) + G_a \cdot x_1 / (G_a + G_{av}) \quad (19)$$

(18), (19)式を変形して

$$x = x_1 + \{G_p + G_v + G_{av} \cdot (x_a - x_1)\} / (G_a + G_{av}) \quad (20)$$

$$i = i_1 + \{G_p \cdot i_p + G_v \cdot i_v + G_{av} \cdot (x_a \cdot i_v - i_1)\} / (G_a + G_{av}) \quad (21)$$

V. R. ロールの有無について(20)式および(21)式をもとに以下に検討する。

3.1 V. R. ロールのない場合

(20), (21)式において $G_v = G_{av} = 0$ とおけるため

$$x = x_1 + G_p / G_a \quad (22)$$

$$i = i_1 + G_p \cdot i_p / C_a \quad (23)$$

第11図 ポケット条件の決定
Fig. 11 Determination of pocket conditions

空気重量 (G_a) 自身は大差ないとすると紙の温度が高いほど、すなわち紙の蒸発量が大いほど x, i は増大する。第11図によりこの関係を以下に説明する。同図中、1の点にポケットの状態があったとする。そこに紙から i_p のエンタルピをもった G_p の蒸気が混入されたとなると、(22), (23) 式により2の点に移動する。1→2への変化にともない比体積も Δv (m^3/kg') だけ増加する。これは、第10図において混合前に ABCDEFGH の体積があったものが、A'B'C'D'E'F' G'H' のように膨脹することを意味する。すなわち、その体積差の分だけ外へ流出することになる。流出水分量は次式により求めることができる。

$$Q_{out} = G_a \cdot x_2 \cdot \Delta v / v_1 \dots \dots \dots (24)$$

v_1 : 混合前の比体積 (m^3/kg')

他方、ポケットに流入する水分量については、紙の蒸発量が紙表面の水蒸気分圧 (P_w) (mmHg) とポケットの水蒸気分圧 (P_a) (mmHg) の差に比例することより、流入する水分量は次式により求められる。

$$Q_{in} = K \cdot (P_w - P_{a2}) \dots \dots \dots (25)$$

Q_{in} と Q_{out} の大小関係により、ポケットの条件は第11図のように移動する。すなわち

1. $Q_{in} > Q_{out}$ の場合、 x, t は増加する方向に向

う

2. $Q_{in} < Q_{out}$ の場合、 x, t は減少する方向に向
3. $Q_{in} = Q_{out}$ においてポケットの平衡が保たれる

3.2 V.R. ロールのある場合

(20), (21) 式において、 $G_p > G_v$ 及び x_a の項は他の項のそれと比べて小さいと次式のようになる。

$$x = x_1 + (G_p - G_{av} \cdot x_1) / (G_a + G_{av}) \dots \dots \dots (26)$$

$$i = i_1 + (G_p \cdot i_p - G_{av} \cdot i_1) / (G_a + G_{av}) \dots \dots \dots (27)$$

これらの式を (22), (23) 式と比較すると、V.R. ロール用の空気重量 (G_{av}) があるため蒸気混合後の絶対湿度及びエンタルピの増分が少なく、1'→2' (第11図) の矢印により表示することができる。すなわち、V.R. ロールを使用する場合には比体積の増減よりも乾き空気の増加の影響が大きいため、ポケットから流出する水分量は次式により求めることができる。

$$Q_{out} = (G_a + G_{av}) \cdot x_2' \cdot G_{av} / (G_a + G_{av}) \\ = G_{av} \cdot x_2' \dots \dots \dots (28)$$

同様に、流入する水分量に関しては

$$Q_{in} = K \cdot (P_w - P_{a2}') \dots \dots \dots (29)$$

サフィックス: ' は、V.R. ロールのついた場合の

混合後の状態をあらわす。また、 Q_{out} と Q_{in} の間には V. R. ロールのない場合と同様のことがいえる。この場合にも、 $Q_{in}=Q_{out}$ がポケット条件を満足する式となる。以上により、つぎのことを知ることができる。

1. V. R. ロールの有無にかかわらず、ポケットへの水分の流出・入の式、すなわち $Q_{in}=Q_{out}$ を解くことにより、ポケット条件を計算することができる。
2. V. R. ロールを使用する場合、式からあきらかなように Q_{out} を空気重量に比例して大きくとることができるため、 $P_w - P_{a2}$ もまた大きくとることができる。すなわち、紙からの蒸発量を大きくとることができる。

4. 実機におけるデータの収集とその解析

各数式モデルの精度を検討するため、これまでに計測したドライヤパートのうちの一例について、数式モデル解析結果と比較した。計測データの解析法をもあわせて以下に記述する。

ドライヤパートにカンバスドライヤが用いられていた従来の抄紙機においては、ドライヤ群のドラムドライヤの本数が増加するにつれてカンバス含水率が増加し、各ドラムドライヤの乾燥能力が不安定であった。V. R. ロールを用いたドライヤパートにおいては、カンバス水分が安定して乾燥能力が増加すると同時にドライヤパートにおいて蒸発される水分のほとんどがドライヤポケット内に蒸発されるため、ポケットをコントロールすることによりドライヤパートをコントロールすることができ、ポケットの各種データを収集することによりドライヤパートの能力を解析することが可能となった。

4.1 ドライヤポケットの計測

ドライヤパートの温度、湿度、及び風速について各種の計測を行なう際の計測計器の主要仕様を第1表にまとめて示した。計測した抄紙機の仕様はつぎのとおりである。

抄速	110~150 m/min
秤量	150~220 g/m ²
抄幅	3,000 mm
水分 入口	60%
出口	5 "
使用蒸気圧	2.7~3 kg/cm ² g

まず、各ポケット（第1図）内の乾・湿球温度（℃）を計測し、各数値からその空気の絶対湿度（kg/kg'）、相対湿度（%）、エンタルピ（kcal/kg'）及び比体積

第11表 計測項目、内容および使用計器

Table 1 Measured item and sensors used

項目	種別	測定内容	使用計器	備 考
湿紙水分		ドライヤパート出・入口及び幅方向水分率	水分計（接触式マイクロウェーブ形）	サンプリングにより行なうこともできる
ドライヤ表面温度		計器指示ドラム内圧及び表面温度	接触形表面温度	—
湿紙表面温度		湿紙フリーランにおいて両面各3点	赤外線式温度計（非接触形）	厚紙の場合は接触形温度計を使用する
ポケット内状態		ポケット内の乾湿球温度及び吹出風速	乾・湿温度計（強制形）熱線式風速計	—
フード排気		フード排気の乾・湿球温度及び風量	"	—
カンバスの状態		カンバス表面温度及び水分率	水分計、表面温度計	水分率校正カーブを使用する

(m³/kg') を算出し、上・下部ドライヤポケット断面積及び吹出風速から各ポケットにおける蒸発水分量を算出する。

$$w_{P1} = (x_1 - x_a) \cdot b \cdot A_1 \cdot V_1 / v_1 \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$w_{P2} = (x_2 - x_a) \cdot b \cdot A_2 \cdot V_2 / v_2 \quad \dots\dots\dots (31)$$

⋮

$$w_{Pn} = (x_n - x_a) \cdot b \cdot A_n \cdot V_n / v_n \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$W_P = \sum_n w_P \quad \dots\dots\dots (33)$$

W_P : ポケット内の総蒸発水分量 (kg/h)

$w_{P1} \dots w_{Pn}$: 第1~n 番目ポケット内の蒸発水分量 (kg/h)

$x_1 \dots x_n$: 第1~n 番目ポケット内の絶対湿度 (kg/kg')

$v_1 \dots v_n$: " 比体積 (m³/kg')

A : 側面有効断面積 (m²)

$V_1 \dots V_n$: 第1~n 番目から吹き出す風速 (m/h)

b : 状態係数

現在、これらポケット状態の計測値を「ドライヤパート能力解析プログラム」により処理しているが、このプログラム解析結果について以下に記述する。

操業中のポケット状態を第12図に、そのインプッ

第12図 ポケット状態

Fig. 12 Pocket conditions

No.	Temp.		Humidity		Specific		air	Area	Evaporated water
	Dry	Wet	Rel.	Abs.	Enthalpy	Vol.	LeL.		
	(°C)		(%)	kg/kg'	kcal/kg'	m³/kg'	(m/sec)	(m²)	(kg/hr)
1—1	22.0	18.0	68	.012	12.4	.86	.85	.200	3.
	22.0	18.0	68.0	.012			.85	.200	3.
2—1	33.0	29.0	74	.024	22.8	.91	.75	.016	1.
2—2	33.0	28.0	68	.022	21.6	.90	.90	.038	1.
2—3	45.0	36.0	56	.035	32.5	.96	.60	.016	1.
2—4	50.0	38.0	47	.038	35.8	.98	.55	.038	2.
2—5	40.0	32.0	57	.028	26.6	.93	.35	.230	6.
	40.2	32.6	60.4	.030			.51	.338	11.
3—1	50.0	45.0	75	.063	51.1	1.01	.50	.038	4.
3—2	48.0	38.0	53	.039	35.9	.97	.40	.016	1.
3—3	33.0	28.0	68	.022	21.6	.90	.40	.038	1.
3—4	30.0	23.0	55	.015	16.5	.88	.35	.016	0.
3—5	36.0	28.0	54	.021	21.6	.91	.34	.230	4.
	39.4	32.4	61.0	.032			.40	.338	10.
4—1	43.0	38.0	73	.042	36.0	.96	.70	.016	1.
4—2	45.0	40.0	73	.047	39.8	.97	.90	.038	2.
4—3	58.0	55.0	86	.113	84.5	1.11	1.10	.016	6.
4—4	48.0	40.0	61	.045	39.7	.98	.55	.038	3.
4—5	50.0	40.0	54	.045	39.6	.99	.30	.230	9.
	48.8	42.6	69.4	.058			.59	.338	22.
5—1	40.0	25.0	29	.014	18.3	.91	.40	.038	0.
5—2	35.0	35.0	100	.037	31.2	.93	.45	.016	1.
5—3	48.0	45.0	84	.064	51.1	1.01	.45	.038	3.
5—4	41.0	40.0	94	.049	39.9	.96	.50	.016	1.
5—5	41.0	38.0	83	.043	36.1	.96	.50	.230	15.
	41.0	36.6	78.0	.041			.46	.338	21.

第13図 ポケット状態インプットシート

Fig. 13 Sheet of pocket conditions

第14図 ポケット内の蒸発水分量

Fig. 14 Evaporated water in pockets

第15図 ドラム表面温度および湿紙表面温度の変化

Fig. 15 Drum surface temperature and sheet temperature

トシートの一例を第13図にそれぞれ示した。縦軸左側の上部に相対湿度(%)を、下部に乾・湿球温度(°C)を、また、同軸右に絶対湿度(kg/kg')を、横軸にポケット No. を示した。主としてポケット No. 8~27

間に V. R. ロールを設置したため、相対湿度は平均 50%を示し良好であった。第12図中のV部が、V. R. ロールの取付位置を示している。ポケット内の温度は 50~60°C と比較的低いが、これは室温が低いためで

No.	Drum			Sheet temp (°C)				
	temp (A)	1	2	3	SA	Mean (B)	(A - B)	
1	100	22	22	22	0	22.0	78.0	0
2	91	30	27	27	3	28.0	63.0	0
3	85	35	33	33	2	33.7	51.3	0
4	98	55	50	48	7	51.0	47.0	0
5	80	53	51	51	2	51.7	28.3	0
6	95	65	64	62	3	63.7	31.3	0
7	82	64	63	62	2	63.0	19.0	1
8	81	60	60	60	0	60.0	21.0	1
9	98	62	62	62	0	62.0	36.0	1
10	81	65	65	65	0	65.0	16.0	0
11	81	65	65	65	0	65.0	16.0	1
12	76	67	65	65	2	65.7	10.3	1
13	78	58	58	57	1	57.7	20.3	0
14	84	61	60	60	1	60.4	23.6	1
15	81	79	77	75	4	77.0	4.0	0
16	119	74	72	72	2	72.7	46.3	0
17	105	81	80	80	1	80.4	24.6	1
18	94	86	85	81	5	84.0	10.0	0
19	107	82	80	78	4	80.0	27.0	0
20	88	84	83	82	2	83.0	5.0	0
21	107	74	72	72	2	72.7	34.3	0
22	75	82	76	76	6	78.0	3.0	0
23	120	85	84	83	2	84.0	36.0	1
24	115	86	84	83	3	84.4	30.6	0
25	121	85	85	85	0	85.0	36.0	0
26	117	84	83	79	5	82.0	35.0	0
27	106	77	77	76	1	76.7	29.3	0
28	90	75	75	68	7	72.7	17.3	0
29	120	83	83	83	0	83.0	37.0	0
30	123	90	84	83	7	85.7	37.3	0
31	106	87	84	84	3	85.0	21.0	0
32	117	92	92	90	2	91.4	25.6	0
33	131	83	80	80	3	81.0	50.0	0
34	110	91	90	88	3	89.7	20.3	0
35	124	82	75	75	7	77.4	46.6	0
36	105	82	82	78	4	80.7	24.3	0
37	120	88	85	84	4	85.7	34.3	0
38	131	95	92	88	7	91.7	39.3	0
39	123	92	91	85	7	89.4	33.6	0

第16図 温度分布インプットシート

Fig. 16 Temperature distribution sheet

あると考えられる。

縦軸に各ポケット内の蒸発水分量 (kg-H₂O/min) を、横軸にポケット No. をとったものを第14図に示した。蒸発水分量の値は(3)式により算出されたもので、第13図の右端に示された値である。第14図から、

乾燥特性曲線を得ることができる。曲線の積分値が計測によって得られたポケット内の蒸発水分量を示し、ドライヤ出・入口の水分率及び抄速から算出した理論蒸発水分量の60~80%を占めていることが知られている。なお、同図中、No. 10, 17, 19, 23, 25の凸形は、

第2表 V.R. ロールシステムとポケットの空気条件

Table 2 Air conditions of V.R. roll system and pockets

項 目		乾 球 (°C)	湿 球 (°C)	相対湿度 (%)	絶対湿度 (kg/kg ^g)	エンタルピー (kcal/kg ^g)	比 体 積 (m ³ /kg ^g)
種 別	V.R. ロールシ ステム	20	16	60	0.01	10	0.85
	ヒータ前 " 後	120	40	1	"	35	1.15
ポ ケ ッ ト		67~60	52~58	50~80	0.08~0.11	75~82	1.0~1.15

第17図 湿紙フリーランにおける温度降下と水分率

Fig. 17 Moisture contents and the temperature difference of a wet sheet

JA ノズルの影響が出たものと考えられる。縦軸に温度 (°C), 横軸にドライヤ No. を示したものを第15図に示した。

計測データ (第16図) における蒸気関係の操作条件はつぎの通りである。

圧力 1-2 群	0.12 kg/cm ² g
2-3 "	1.54 "
3 "	2.64 "
4 "	2.66 "
ヘッド	4.05 "
蒸気流量	11.6t/h

第16図において, ドラム No. 22, 28 の表面温度は低い, ドレン排出上の問題と考えられる。また, ドライヤ能力は 7.9 kg ペーパー / m²・h であるので, さらに増速, 増産が可能であることを示している。

ここで, 湿紙表面の温度を, ドライヤを離れた直後, 中央部及びドライヤ接触寸前の3点について計測し, この間の温度降下を算出する。前報¹⁾に報告したように, ポケット内空気から算出された水分量は, 湿紙表面からの蒸発量とカンバスからの蒸発量が混合されたものである。蒸発曲線 (第14図) からゾーン-①~③

第18図 ポケット内の空気状態 (V.R. ロール運転時)

Fig. 18 Pocket conditions (V.R. roll system)

における平均通過湿紙重量を算出し、それらの湿紙重量が温度降下するものとしてこれから放熱量を得、さらに蒸発水分量を得ることができる。計測の結果、ポケット内蒸発水分量の約60~80%が、湿紙表面から蒸発していることが知られている。

第17図は、縦軸の下部に温度(°C)(フリーラン中の湿紙温度降下)を、上部に湿紙水分率(%)を、横軸にドライヤ No. を示し、点線は各ゾーンにおける平均水分率を示す。計測によって得たポケット内の条件、V.R. ロール給気条件及び蒸発水分量の間の関係をまとめて第2表に示した。ここで、V.R. ロール給気風量を G (kg'/h) とすれば、ドライヤポケット内

の空気中に含まれる熱量はつぎの三つである。

- (1) V.R. ロールヒータで加熱された熱量(q_1) (kcal/h)

加熱前後のエンタルピの差を Δi とおくとつぎのようになる。

$$q_1 = G \cdot \Delta i \text{ (kcal/h)} \dots\dots\dots (34)$$

- (2) 湿紙及びカンパスから蒸発した水分が空気中にもちこむ熱量(q_2) (kcal/h)

全ポケットに対する V.R. ロールの設置率を α とすれば、蒸発水分量は $\alpha \cdot W_p$ (kg-H₂O/h) となる。湿紙表面温度から飽和蒸気のエンタルピを i とすると次式を得る。

第19図 カンパス水分の計測 (V.R. ロールを使用)

Fig. 19 Moisture profile of canvas (V.R. roll on)

第20図 カンパス水分の計測 (V.R. ロールを停止)

Fig. 20 Moisture profile of canvas (V.R. roll off)

$$q_2 = a \cdot i \cdot W_p \text{ (kcal/h)} \dots\dots\dots (35)$$

- (3) ドラムから周囲への熱伝達される熱量 (q_3)
(kcal/h)

これらの q_1, q_2, q_3 の熱量が V.R. ロール給気 (G) (kg/h) に含まれて、ポケット両側からフード内に出ると考えられる。したがって、ポケット内のエンタルピを i_p とすれば次式により示される。

$$i_p = (q_1 + q_2 + q_3) / G \text{ (kcal/kg')} \dots\dots\dots (36)$$

これらの計算値と計測値を対応させることにより、両値はほぼ一致していることを確認することができた。これらの関係を湿り空気線図上に書くと、第18図のようになる。同図中、ヒータにより①の空気が加熱されて②に達し、そのエンタルピは Δi だけ増加する。空気はカンバスを通過してポケット内に噴出するが、この際、カンバス中の水分を奪ってポケット中へ出、さらに紙から蒸発水分を吸収してポケットの両側へ出る。この間、空気中の水分は Δx 上昇し、エンタルピも増加して③へ至る。すなわち、正常に作動している抄紙機において、空気の変化は①→②→③となることがわかった。

これらの計算値を空気線図上にプロットさせることにより、能力及び使用状態を容易に判定することができる。

4.2 ドライヤカンバスの水分率及び温度の計測

本節には、実機におけるカンバスの水分率、温度の計測について記述する。

4.2.1 カンバス水分率の測定原理

カンバス水分率の計測にはポータブルのマイクロウェーブ型を使用した。マイクロウェーブ周波数に対する水の誘電率は約75で、紙、カンバス、フェルトなどでは2～4となる。この事実は、含水量が多い場合、水分を含む物質は水分の少ない物質よりも電界に対する影響が大きいことを意味し、その影響度はマイクロウェーブ周波数を使用することにより、高い精度で測

定することができる。マイクロウェーブに対して共振する回路、すなわち共振子を使用したセンサは、接触面としてプラスチックでおおわれている1面だけを残してすべて金属で密閉されている。

共振子の電磁界は部分的に接触面外にも分布しており、水分の多い面が接触面に押しあてられると、共振子の共振周波数はシフトされる。この周波数シフトの大きさは、主として物質に含まれる水分によって決定される。紙又はカンバスの坪量 (g/m^2) が既知であるので、メータの指示と実水分率間の校正カーブを各種カンバスについて用意している校正曲線を使用することにより、実カンバスの水分率を求めることができる。水を含んだ物質のため生じた周波数シフトは、セントラルユニットによりメータを指示できる形及びレコード出力の形に変換される。物質によるマイクロ波の吸収、すなわち電気伝導損失、誘電成極損失、pH 値などは、その計測値にほとんど影響を及ぼさない。

4.2.2 カンバス水分の計測値

実際の計測においては、上述した水分計の検出部をカンバスに圧着して計測するため、圧着力の差によるメータの指示の差はほとんどないことを確認している。抄速: 400 m/min, 坪量: 125 g/m^2 の中芯を抄造中のドライヤパートにより計測した結果を第19図及び第20図に示した。両図中、「幅方向」とは検出端を抄紙機の流れ方向と直角に移動させたもので、「流れ方向」は操作側、中央部及び駆動側のある1点でカンバスの流れ方向の水分変化を示す。このドライヤパートは3群からなり、1・3群はカンバス (絶乾坪量: 2,420 g/m^2 , 通気度: 1,500 $\text{cc/cm}^2/\text{min}$), 2群はプラスチックカンバス (絶乾坪量: 1,800 g/m^2 , 通気度: 10,000 $\text{cc/cm}^2/\text{min}$) を使用している。各群のボトムカンバスについては、V.R. ロール使用時、各ドライヤの入口カンバスの水分率は1群から6.5, 8.0, 8.1%を示し、同ロールを停止時には同様に10.2%、

第21図 カンバス温度
Fig. 21 Canvas temperature

第22図 乾燥プログラムフローシート

Fig. 22 Flow sheet of program

14.9, 12.0%, を示している。プロフィールについてみれば, V. R. ロール使用時 (第19図) はほとんどフラットであるが, 同ロールの停止時 (第20図) には絶対値で $150 \sim 200 \text{ g-H}_2\text{O/m}^2$ の水分差がみられる。これらの事項を考察すると, V. R. ロールを使用したドライヤにおけるカンバスは, 各 V. R. ロールを通過後, 水分をポケットに吹き出すことにより乾燥した定常な状態にあると思われる。他方, V. R. ロールを停止した場合には, ポケット内空気の幅方向が不均一となることにより湿紙水分プロフィールへの悪影響が出て, これがカンバスプロフィールとして直接に現われてくる。さらに, カンバス絶対湿度の上昇により湿紙の乾燥速度が低下し, ドライヤ出口の水分率が上昇する。カンバスガイドなどを通過するリターン部におけるカンバスの蒸発量は, カンバス中の水分量の絶対値の多い停止時にいちじるしい。

4.2.3 カンバス温度の計測

本計測は, 接触形の表面温度計によりデータを収集している。たとえば, 上述した, 計測した抄紙機 (4.1節) におけるカンバス温度をプロットしたものを第21図に示した。各群のカンバスの平均値は, トップで1群から59, 65, 88°C となり, ボトムで50, 62, 77°C となっていた。

5. 実機データと数式解の比較

5.1 乾燥計算プログラム

乾燥プログラムのフローシートを第22図に示した。仕様, 作業条件が与えられると, インプットデータとしてドラム表面温度, V. R. ロールの仕様, 雰囲気条件 (プログラム中にもそう入することができる), 物性値を読みこむ。これらとは別個に蒸発係数 (湿紙水分率に応じて蒸発速度にかける重さの係数), 熱伝達率などを選択したのち, 初期条件をあたえて繰り返し

て計算し、紙及びカンバスの温度、水分率その他をアウトプットさせる。

5.2 実機データとの対比

上述した計測した抄紙機(4.1節)について計算を行なった。ドライヤ: 39本, 抄速: 110 m/min, 坪量: 220 g/m², カンバス坪量: 2,150 g/m² のもので、湿紙とカンバス間の熱伝達係数を 200 kcal/m²・h・°C と仮定した。初期条件は、実機データをそのまま使用して湿紙の入口温度: 22°C, 入口水分率: 60%とした。

第3表 カンバスの温度および水分率
Table 3 Initial conditions of canvas

種別	項目	温度 (°C)	水分率 (%)
1 群	トップム	56	17.1
	ボトム	45	20.0
2 群	トップム	56	22.4
	ボトム	"	17.1
3 群	トップム	68	18.6
	ボトム	66	14.1

各群のカンバスの温度と水分率を第3表に示した。

湿紙温度について第23図-(a)に示した。細い実線が計測値を、太い実線は湿紙の中央の温度をあらわす。2点鎖線はドライヤ入口のドラム側, 1点鎖線は外気側を示す。初期乾燥時, 計算値と計測値は大きく離れているが, 全体的にみると非常によく合致していることがわかる。

湿紙水分率について同図-(b)に示した。プロット点が計算値, 1点鎖線は絶対湿度から蒸発量を出して湿紙水分率に直した値, 実線は湿紙表面温度の温度降下から算出した水分率の値である。加熱ゾーン, 恒率ゾーン, 減率ゾーンの蒸発係数は, それぞれ0.5: 1: 0.08とした。この係数は, 主として紙種, 坪量, フリーネスなどにより変化するとと思われる。同図から, 絶対湿度から計算した値とよく一致していることがわかる。

カンバス温度について同図-(c)に示した。同様に, 細い実線が計算値を, 太い実線は中央を示す。1点鎖線がドラム側のカンバスをあらわしており, これが計

第23図-(a) 実機データと計算値の比較(湿紙温度)

Fig. 23-(a) Comparison between calculated value and actual paper machine (sheet temperature)

第23図-(b) 実機データと計算値の比較(湿紙水分率)

Fig. 23-(b) Comparison between calculated value and actual paper machine (sheet moisture content)

第23図-(c) 実機データと計算値の比較 (キャンパス温度)

Fig. 23-(c) Comparison between calculated value and actual paper machine (canvas temperature)

測値と対応する。同図においても計算値は実機データと非常によく合致している。このことは、カンバスと湿紙間の熱伝達係数が、仮定した値に非常に近いことによるものと思われる。

カンバスの水分率は、群の出-入間でほとんど変化がなかった。V.R. ロールにより吹き出される水分量が全ポケット蒸発水分量に対する比率は、場所により異なるが10~20%であった。

6. 結 言

カンバスの乾燥に対する基礎実験により、V.R. ロールにより吹き出される水分量はカンバスの水分含有率に比例して増大すること、また、その水分量がポケット内の蒸発量に対する比率は10~20%であることがあきらかになった結果、つぎの計算を容易に行なうことができるようになった。すなわち、V.R. ロールがある場合とない場合について、ポケット内雰囲気の平衡状態の計算式を導入することができたため、前報¹⁾に報告した数式モデルと併用することにより、さらに

完全なシミュレーションが可能となった。

数式モデルの計算と、実機データを比較した結果、紙種などに応じた蒸発係数を導入することにより、モデルを十分に実用化することができるとわかった。これら一連の研究成果をもとに、さらに実験、解析を継続し、より広範囲に数式モデルを実用化していくため、今後ともいっそうの努力を続けていく所存である。

終りに、本実験に際し終始変らないご協力と多くのご助言をいただいた敷島カンバス株式会社八幡工場の森工場長をはじめ関係各位のご好意に対し、誌上ながら深く感謝の意を表するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 武田剛一, 矢ヶ部政宏: 抄紙機における湿紙乾燥メカニズムの解析——第1報 乾燥メカニズムの数式化および各係数の決定——紙パ技協誌 28 (1) 14 (1974)
- 2) 平岡正勝: 通気乾燥装置 乾燥装置 日刊工業新聞社 昭和43年4月 p 47~85