抄紙機における湿紙乾燥メカニズムの解析 (第1報)

— 数式化および各係数の決定 —

石川島播磨重工業株式会社産業機械事業部 武田剛一, 矢ヶ部政宏
製紙プラスチック機械技術部Analysis of Drying Mechanism on Paper Machine
1st. ReportFormulation and Determination of Each Factor of
Wet Sheet Drying Mechanism

Goichi Takeda and Masahiro Yakabe

Pulp, Paper & Plastics Machinery Engineering Department, Industrial Machinery
Division, Ishikawajima-Harima-Heavy-Industries. Co., Ltd.

Several analysis of wet sheet drying mechanism in the multi-cylinder dryer part have been informed and we have introduced our own idea and developed the new formulae. That is, we have succeeded in computing the changing processes of moisture content and temperature of wet sheet by using these formulae. Many different elements - basic weight, dryer surface temperature, property and tension of dryer clothing - which have effects on the wet sheet drying are used as the functions of drying speed. As a result, the construction of dryer part are able to be determined by these formulae where certain basic design data are provided. The test results and the formulae are presented in this paper.

1. 緒 言

抄紙機乾燥部における湿紙乾燥メカニズムの解析はこれまで幾つか報告されているが、我々は独自の考えを導入発展せしめた数式モデルを開発、実用化の段階に入った。すなわち湿紙乾燥に影響を与える数多くの要素を、乾燥速度の函数として表示し、湿紙水分率および温度の経時変化を、モデル数式により算出可能としたものである。この結果、ドライヤパート構成決定に要する、基本設計条件を与えることにより、ドラムドライヤ、V・Rロール本数等のドライヤパート構成が算出され、更に稼動条件における、各種計測データを用い、現状における欠陥箇所発見が容易となった。これら数式における各要素決定に際し、各種実験を行なったが、ここにこれら実験内容および結果を、数式モデルと共に報告する。

2. 乾燥メカニズムの数式化

2.1 モデル相の分割

湿紙の乾燥は湿紙およびドライヤカンバスの含有水分率、温度に左右されるということ、衆知の事実であるが、我々は湿紙に加えてドライヤカンバスに関しても相を考えた。相の役割は(図1, 2)に示す。これまでに行なわれていると同様に湿紙フリーランA(N)

～B(N)をIゾーン、湿紙の片面がドライヤに接し他面が空気に接している部分B(N)～C(N)をIIゾーン、湿紙がカンバスにてドライヤに圧着されている部分C(N)～D(N)をIIIゾーン最後にIIゾーンと同一条件下のD(N)～E(N)をIVゾーンとする。一方ドライヤカンバスについては、(N-1)番目ドライヤとN番目カンバスロール(V・Rロール)間F(N)～G(N)をVゾーン、N番目カンバスロール(V・Rロール)にラップしている部分G(N)～H(N)をVIゾーンとする。(N-1)番目カンバスロールに関しても、H(N-1)～I(N-1)をVIIゾーン、(N-1)番目カンバスロールとドライヤ間I(N-1)～J(N-1)をVIIIゾーンとする。同様に、(N-1)番目ドライヤに関してもV(N-1), VI(N-1), VII(N-2), VIII(N-2)が存在する。これらの分割表示方法は、Iゾーンにおける蒸発に、V(N), VI(N), VII(N-1)およびVIII(N-1)が影響する事を検討するのに有効に用いられる。

2.2 湿紙およびカンバスにおける熱および物質移動

2.2.1 仮定

数式モデルを解くに際し、次の4つの仮定を設ける。

- 1) 湿紙およびカンバスは、幅方向の熱および物質の移動はないものとする。
- 2) 湿紙流れ方向に関しては、経時変化のみで、熱お

図1 湿紙乾燥メカニズム解析モデル図 (I)

図2 湿紙乾燥メカニズム解析モデル図 (II)

よび物質の移動は無視する。

- 3) 湿紙とドラムドライヤ間の熱伝達率は湿紙水分含有率により変化するものとする。
- 4) 各サイクルにおいては、ドライヤ表面温度は変化しないものとする。

仮定(1), (2)により、これらの問題は非定常熱伝導の問題として考えることができる。一般に数値解析に用いられる一次元非定常の熱伝導は、(図3)に示すごとく次の2つに大別できる。すなわち、

(a) $\Delta\tau$ の間に②→①, ③→①に流入(出)した熱量は、①の熱量増加(減少)となり、 $\Delta\tau$ 時間後に①の温度 t_1 は t_1' になる場合。

(b) $\Delta\tau$ の間に他より熱量 q を受け①②間の熱移動により壁面の温度 t_1 が t_1' になる場合。

これら各々の場合に成立する式は $F = (\lambda/C \cdot \rho) \times (\Delta\tau/\delta^2)$ とおいて、次のごとく変形される。

$$(a) \text{の場合, } t_1' = F \left\{ t_2 + t_3 + \left(\frac{1}{F} - 2 \right) t_1 \right\} \dots \dots (2-1)$$

$$(b) \text{の場合, } t_1' = 2F \left\{ t_2 + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_1 + q(\delta/\lambda) \right\} \dots \dots (2-2)$$

ここで λ : 湿紙熱伝導率 (kcal/m·h·°C), C : 紙匹比熱 (kcal/kg·°C), ρ : 紙匹の密度 (kg/m³), $\Delta\tau$: 時間 (h), δ : 分割湿紙厚さ (m), q : 熱量 (kcal/m²h) を示す。

2.2.2 II, IVゾーンにおける熱および物質移動

前記仮定に基づき、IIおよびIVゾーンの熱伝達および物質移動の式は次のごとく表わされる。(IVゾーンに関してはサフィックスが変化するだけであるため削除する。)

$$\text{初期条件は } t_{II \cdot B} = t_{I \cdot E} \dots \dots (2-3)$$

ここで $t_{II \cdot B}$: IIゾーン開始温度 (°C), $t_{I \cdot E}$: Iゾーン終了時温度 (°C) を示す。

境界条件はドライヤ側で

$$q_s = H_s(t_s - t_1) \dots \dots (2-4)$$

(a) 湿紙 (またはカンバス) の内側の例
(a) の場合

時間 $\Delta\tau$ 間に 1 に流入する熱量 (q)

$$q = \Delta\tau \left[(t_2 - t_1) \frac{\lambda}{\delta} + (t_3 - t_1) \frac{\lambda}{\delta} \right]$$

1 → 1' に上昇するに要する熱量 (q)

$$q = C \cdot \rho \cdot \delta (t_1' - t_1)$$

2 つの熱量は同一であるので, t_1' に関し整理すれば

$$t_1' = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta\tau}{\delta^2} \left[t_2 + t_3 - 2t_1 + \frac{C \cdot \rho \cdot \delta^2}{\lambda \cdot \Delta\tau} t_1 \right]$$

図 3 数値計算モデル (I)

(b) 湿紙 (またはカンバス) の外側の例

ここで $\Delta\tau$: 時間 (H)

t : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

λ : 熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

δ : 分割厚さ (m)

C : 比熱 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ρ : 密度

ここで, q_s : ドライヤより湿紙への伝達熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$) H_s : ドライヤ湿紙間の熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$), t_s, t_1 : ドライヤ表面および湿紙温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示す。ドライヤ面の逆側, すなわち空気に接している湿紙面において次式が成立する。

$$q_{p,a} = H_{p,a}(t_n - t_a) + f(V \cdot l) \cdot (P_w - P_a) \dots (2-5)$$

ここで $q_{p,a}$: 湿紙より空気への伝達熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), $H_{p,a}$: 湿紙, 空気間の熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$), t_n , t_a : 湿紙表面および空気の温度 ($^{\circ}\text{C}$), $f(V \cdot l)$: 蒸発係数, P_w, P_a : 湿紙中および空気の蒸気分圧 (mmHg) を示す。(2-5) 式の第 1 項は伝達熱量を, 第 2 項は, 物質移動量を示す。ここで, 境界条件 (2-4, 5) 式, 初期条件 (2-3) 式および湿紙厚さ方向温度分布を示す (2-1, 2) 式より, 数式解は, 次のごとく示される。

II, IV ゾーンの蒸発水分量

$$\Delta W_{II} = \sum_0^{\tau} f(V \cdot l) \frac{(P_w - P_a)}{\gamma} \dots (2-6)$$

ここで ΔW_{II} : II ゾーンにおける水分蒸発量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), γ : 水の蒸発潜熱 (温度の函数にて変化) (kcal/kg) を示す。

II および IV ゾーンにおける, $\Delta\tau$ 時間後の温度分布は (2-1, 2) 式より次のごとく示される。

$$\text{ドラム側, } t'_{1,II} = 2F \left\{ t_{2,II} + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_{1,II} + q_s \cdot \delta / \lambda \right\} \dots (2-7)$$

$$\text{湿紙中央, } t'_{K,II} = F \left\{ t_{K-1,II} + t_{K+1,II} + \left(\frac{1}{F} - 2 \right) \cdot t_{K,II} \right\} \dots (2-8)$$

$$\text{空気接面, } t'_{n,II} = 2F \left\{ t_{n-1} + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_{n,II} - q_c \cdot \delta / \lambda \right\} \dots (2-9)$$

これらの数式中 $f(V \cdot l)$ は, 一般に下式にて示される。 $f(V \cdot l) = a \cdot l^n (1 + b \cdot V)^m$, また乱流熱伝達に関する $H_{p,a}$ は, $H_{p,a} = a' \times V^n$ にて示される。ここで V : 乾燥面に接する空気速度 (m/sec), l : ゾーン長さ (m), a, n, m および a' は定数を示す。これまでに用いている $\Delta\tau$ の時間間隔の許容最大値は熱力学第 2 法則に基づき次式で示される。

$$\Delta\tau \leq C \cdot \rho \cdot \delta^2 / 2\lambda \dots (2-11)$$

この式より時間間隔の最大値を得ることができる。

2.2.3 III ゾーンにおける熱伝達および物質移動

III ゾーンにおける熱および物質の移動は次のごとく表わされる。なお各サフィックスに関しては (図 4) を参照されたい。

$$\text{初期条件 } t_{III,B} = t_{II,E}, t_{III,C,B} = t_{III,C,E} \dots (2-12)$$

$$\text{境界条件 } \text{ドライヤ側 } q_s = H_s(t_s - t_1) \dots (2-13)$$

湿紙とカンバス間にて

$$q_{p,c} = H_{p,c}(t_n - t_{n+1}) + f(V \cdot l) (P_n - P_{n+1}) \dots (2-14)$$

ここで $t_{III,B}$: III ゾーン開始湿紙温度, $t_{II,E}$: II ゾー

図4 数値計算モデル (II)

ン終了時湿紙温度 ($^{\circ}\text{C}$), $t_{\text{III} \cdot \text{C} \cdot \text{B}}$, $t_{\text{III} \cdot \text{C} \cdot \text{E}}$: IIIゾーン開始およびVIIIゾーン終了時のカンバス温度, ($^{\circ}\text{C}$), $q_{p \cdot c}$: 湿紙よりカンバスへの伝達熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), $H_{p \cdot c}$: 湿紙とカンバス間の熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$), P_n, P_c : 湿紙表面およびカンバス面の水蒸気分圧 (mm Hg) を示す。カンバスの空気側では次式となる。

$$q_{c \cdot a'} = H_{c \cdot a'} (t_{n+4} - t_{a'}) + f(V \cdot l) (P_{n+4} - P_{a'}) \quad (2-15)$$

ここで $q_{c \cdot a'}$: カンバスより外気への伝達熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), $H_{c \cdot a'}$: カンバスと空気間の熱伝達係数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$), t_{n+4} : カンバスの空気側温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示す。境界条件 (2-13, 14, 15) 式, 初期条件 (2-12) 式, および湿紙厚さ方向の温度分布 (2-1, 2 式) より, 数式解は次のごとく示される。

IIIゾーンにおける湿紙よりの蒸発水分量は,

$$\Delta W_{\text{III} \cdot \text{P}} = \sum_0^{\tau} f(V \cdot l) \cdot (P_n - P_{n+1}) / \gamma \quad (2-16)$$

IIIゾーンにおけるカンバスよりの蒸発水分量は,

$$\Delta W_{\text{III} \cdot \text{C}} = \sum_0^{\tau} f(V \cdot l) \cdot (P_{n+4} - P_{a'}) / \gamma \quad (2-17)$$

IIIゾーン $\Delta \tau$ 時間後の温度分布はドラム側, 湿紙中およびカンバス側に関し, 次式で示される。

$$t'_{1, \text{III}} = 2F \left\{ t_{2, \text{III}} + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) t_{1, \text{III}} + q_{\delta} \delta / \lambda \right\} \quad (2-18)$$

$$t'_{K \cdot \text{III}} = F \left\{ t_{K+1, \text{III}} + t_{K-1, \text{III}} + \left(\frac{1}{F} - 2 \right) t_{K \cdot \text{III}} \right\} \quad (2-19)$$

$$t'_{n \cdot \text{III}} = 2F \left\{ t_{n-1, \text{III}} + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_{n \cdot \text{III}} - q_{p \cdot c} \delta / \lambda \right\} \quad (2-20)$$

これら (2-18, 19, 20) 式は湿紙温度を示す。一方カンバスに関して見れば, 次の3式にて表示される。ドライヤ側,

$$t'_{n+1 \cdot \text{III}} = 2F_c \left\{ t_{n+2} + \left(\frac{1}{2F_c} - 1 \right) \cdot t_{n+1} + q_{p \cdot c} \delta_c / \lambda_c \right\} \quad (2-21)$$

カンバス中央,

$$t_{n+K \cdot \text{III}} = F_c \left\{ t_{n+K-1, \text{III}} + t_{n+K+1, \text{III}} + \left(\frac{1}{F_c} - 2 \right) \cdot t_{n+K \cdot \text{III}} \right\} \quad (2-22)$$

空気側,

$$t_{n+4 \cdot \text{III}} = 2F_c \left\{ t_{n+4, \text{III}} + \left(\frac{1}{2F_c} - 1 \right) t_{n+4, \text{III}} - q_{c \cdot a} \cdot \delta_c / \lambda_c \right\} \quad (2-23)$$

なお時間間隔の許容値は (2-11) 式と同様カンバスに関しても次式で表示される。(ここでサフィックス C は, カンバスを示す。)

$$\Delta \tau_c \leq C_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c^2 / 2 \lambda_c \quad (2-24)$$

2.3 湿紙フリーランにおける熱および物質移動

2.3.1 仮定

ドライヤポケット部における湿紙の熱および物質移動に関しては、現在まだ充分な解析がなされていない。我々は、数式モデルとして(2-2図)中X・Yにて囲まれた四角の領域について検討した。これらの事項解析にあたり、次の2つの仮定を設けた。

- (1) X-X, Y-Y 面において熱および物質の移動はない。
- (2) ポケット内部においては、圧力 P_{a-1} , P_{a-2} (A-B面の左右の雰囲気の水蒸気圧分布) は一定とする。

2.3.2 I ゾーンにおける熱および物質移動

I ゾーンにおいては、周囲条件の変化により、多量の蒸発が行なわれる。モデルとして(図4)に示すごとく湿紙全体の厚さ $(n-1) \cdot \delta$ で湿紙面左右より、 $q_{1(N)}$, $q_{2(N-1)}$ の放熱がある。

初期条件は、 $t_{I \cdot B} = t_{IV \cdot E}$ (2-25)
 ここで $t_{I \cdot B}$: I ゾーン開始温度 (°C), $t_{IV \cdot E}$: N ゾーン最終温度 (°C) を示す。境界条件は次式で示される。

$$q_{1(N)} = \sigma \cdot \varepsilon \{ (t_n + 273)^4 - (t_{a1(N)} + 273)^4 \} + H_{p-a}(t_n - t_{a1(N)}) + f(V \cdot l)(P_{w1(N)} - P_{a1(N)}) \dots \dots \dots (2-26)$$

$$q_{2(N-1)} = \sigma \cdot \varepsilon \{ (t_1 + 273)^4 - (t_{a2(N-1)} + 273)^4 \} + H_{p-a}(t_1 - t_{a2(N-1)}) + f(V \cdot l)(P_{w1(N-1)} - P_{a2(N-1)}) \dots \dots \dots (2-27)$$

ここで $q_{1(N)}$, $q_{2(N-1)}$: 紙面よりの放熱量 (kcal/m²・h), P_w , P_a : 湿紙および空気中の水蒸気分圧 (mmHg), $t_{a1(N)}$, $t_{a2(N-1)}$: 湿紙両面の雰囲気温度 (°C), σ : ボアソン定数, ε : 放射率を示す。

初期条件(2-25)式、境界条件(2-26, 27)式および湿紙厚さ方向の温度分布(2-1, 2)式より数式解は次のごとく示される。

I ゾーン蒸発水分量 (右側):

$$\Delta W_{I \cdot 1(N)} = \sum_0^T f(V \cdot l) \cdot (P_{w1(N)} - P_{a1(N)}) / \gamma \dots \dots \dots (2-28)$$

I ゾーン蒸発水分量 (左側):

$$\Delta W_{I \cdot 2(N-1)} = \sum_0^T f(V \cdot l) \cdot (P_{w2(N-1)} - P_{a2(N-1)}) / \gamma \dots \dots \dots (2-29)$$

(2-28, 29) 式より I ゾーンの総蒸発水分量 ΔW_T は、次のごとく示される。

$$\Delta W_T = \Delta W_{I \cdot 1(N)} + \Delta W_{I \cdot 2(N-1)} \dots \dots \dots (2-30)$$

I ゾーンにおける Δt 時間後の湿紙中の温度分布は、空気側、湿紙中と各々次式で示される。

$$t_1' = 2F \left\{ t_2 + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_1 - q_{1(N)} \cdot \delta / \lambda \right\} \dots \dots \dots (2-31)$$

$$t_K' = F \left\{ t_{K+1} + t_{K-1} + \left(\frac{1}{F} - 2 \right) \cdot t_K \right\} \dots \dots \dots (2-32)$$

$$t_n' = 2F \left\{ t_{n-1} + \left(\frac{1}{2F} - 1 \right) \cdot t_n - q_{2(N-1)} \cdot \delta / \lambda \right\} \dots \dots \dots (2-33)$$

2.3.3 ドライヤポケット内雰囲気条件

I ゾーンにおける伝達熱量は(2-26, 27)式に示すごとく、ドライヤ、湿紙およびカンパスにより形成されるドライヤポケット内の条件 P_a , t_a によって、ほぼ支配される。最近の抄紙機ドライヤパートでは、V・Rロール(熱風噴出ロール)が一般に使用されているため、これらの影響は無視できない。図2に示すごとく、ポケット内の水分の流出入には次のごとく関係がある。すなわち、(流入する水分量) = (紙面よりの蒸発水分量) + (V・Rロールより噴出する空気中の水分量)、また一方(流出する水分量) = (ドライヤポケットの両側の断面より流出する空気中に含まれる水分量)、にて示される。これまでの数多くの、V・Rロール使用実機における測定データにより、ドライヤポケット内の最適水分率および温度は既知である。更に、「I ゾーンにおける熱および物質移動」および次項に記す、通風乾燥により、湿紙からの蒸発速度が最大となるための最適カンパス含有水分率およびV・Rロールの諸条件が決定される。

2.4 V・Rロール(熱風噴射ロール)による通風乾燥

通風乾燥については、桐柴¹⁾らにより研究されているが、通気度の低いカンパスに関しては、ほぼ、減率乾燥であると考えられる。また高通気度のカンパスに関しては、ドライヤパートウェットエンドでは恒率乾燥となる可能性もあるが、カンパス使用効果を有効に発揮させるためには、減率乾燥のみを考慮する事で、充分である。一般に恒率乾燥では、厚さ方向で均一に

図5 カンパス乾燥特性

蒸発が行なわれている場合を示し、減率乾燥では、厚さ方向で不均等に蒸発が行なわれている場合を言っている。乾燥域に関しては一般に(図5)のごとく示されるが、ドライヤカンバスを対象に考える場合には、第2減率乾燥域のみを考えれば良いと思はれる。すなわちカンバスがV・Rロールに達した時の水分は限界水分率以下の領域である。

(図6)においてV・Rロールに接触した部分を、1, 2...N分割し、この中のK番目を取り出すとカンバス層全体の含水率 W_K は、次式で示される。

$$W_K = \frac{1}{\xi_L} \left[\phi_0 \xi_L + I_n \left\{ \frac{1 + (\phi_0 - 1) \cdot e^{\phi_0 (\xi_c - \xi_L)}}{1 + (\phi_0 - 1) \cdot e^{\phi_0 \cdot \xi_c}} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (2-34)$$

ここで $\xi_L = K_a \cdot L / G_0$, K_a : 物質移動容量係数, G_0 : 空気質量速度, L : カンバス厚さ, C_e : カンバスの平衡含水率, C_c : カンバスの限界含水率, C_0 : カンバス入口含水率, W_K : 層全体の平均含水率, $W_K = (W_K - C_e) / (C_e - C_e)$ にて示す無次元表示の含水率, $\phi_0 = (C_0 - C_e) / (C_e - C_e)$ にて示す無次元表示の入口含水率, ξ_c : 無次元表示の限界長さを示す。

2.5 数式の実際の応用

前記の式を用い、実機において、1サイクルの試算例を示せば、次のごとく示される。本抄紙機は、40本

図6 カンバスの乾燥モデル

の1,520 mm 径のドライヤを有しているが、計算例は No. 13~No. 14 のドライヤ間について示している。操業条件は、抄速 110 (m/min), 坪量 220 (g/m²), 使用カンバスは、綿カンバスで、坪量 2,330 (g/m²) 通気度 1,200 (cc/min/cm²), ドライヤ表面温度 85 (°C) とする。初期条件は、13 番目ドライヤ入口にて、湿紙温度 60 (°C), 水分率 45 (%), カンバス温度 56 (°C), 水分率 17 (%) とした。境界条件は、ドライヤ

表1 湿紙温度変化の計算例

ゾーン	入口よりの長さ (m)	湿紙温度 °C			蒸発水分量 g	ゾーン別水分蒸発量 g
		ドラム側	中側	空気 (カンバス) 側		
II	0	60.0	60.0	60.0	0	0.083
	0.232	64.8	61.2	59.0	0.031	
	0.464	65.6	62.0	59.0	0.052	
III	0.714	65.8	63.2	61.8	0.000	0.020
	0.964	67.2	63.9	62.5	0.001	
	1.214	67.7	64.8	63.3	0.002	
	1.464	68.5	65.5	64.2	0.002	
	1.714	67.0	66.4	64.8	0.002	
	1.964	69.8	67.0	65.7	0.003	
	2.214	70.0	67.7	66.3	0.003	
	2.464	71.0	68.4	67.6	0.003	
	2.714	71.4	69.2	67.7	0.004	
IV	2.946	72.2	69.6	68.8	0.051	0.145
	3.178	72.5	70.5	69.1	0.094	
I	3.389	68.0	70.5	66.8	0.066 / 0.054	0.649
	3.600	66.7	68.0	66.7	0.075 / 0.070	
	3.811	63.5	66.8	63.5	0.096 / 0.096	
	4.022	61.5	64.0	61.5	0.096 / 0.096	
合計						0.897

表2 カンバス温度変化の計算例

ゾーン	入口よりの長さ (m)	カンバス温度 °C		
		湿紙側	中 側	空気側
Ⅲ	0.464	56.0	56.0	56.0
	0.714	56.8	56.0	56.0
	0.964	58.0	56.1	56.0
	1.214	59.0	56.2	56.2
	1.464	60.0	56.4	56.2
	1.714	60.9	56.4	56.2
	1.964	61.8	56.4	56.2
	2.214	62.5	56.7	56.3
	2.464	63.9	56.9	56.5
	2.714	64.2	57.1	56.5

ポケット内雰囲気乾燥温度 55 (°C), 相対湿度 50 (%) とした。計算中で、湿紙とドライヤ間の熱伝達率は、後記の実験値を用い、湿紙とカンバス間については、実測データより推定した値を用いた。同時にカンバスは限界水分率に達するまで、蒸発は開始しないと仮定した。計算結果を湿紙については (表1) に、カンバスについては (表2) に示す。

図3. 数式に用いた各要素決定のための実験および結果

3.1 概 要

前項にて湿紙乾燥メカニズム解析のための、モデル

数式および計算例に関して記したが、我々は、これら数式に用いた未知数を知るために一連の実験を行ない、乾燥に影響する各因子と乾燥速度の関係を求め、これらすべての要素を熱伝達率の函数として表わした。ここに実験により求めるべき未知数、実験方法および結果に関し記す。

3.2 実験により求めた諸因子

我々は、本実験により下記項目に関し各種データを収集、解析し前項数式に用いることとした。

- (1) 湿紙とドライヤ表面間の熱伝達率 (湿紙水分率変化との関係)
- (2) 湿紙坪量と乾燥速度の関係。
- (3) ドライヤ表面温度と乾燥速度の関係。
- (4) ドライヤカンバステンションと乾燥速度の関係。
- (5) ドライヤカンバス品種 (通気度) と乾燥速度の関係。

3.3 実験装置および実験方法

実験装置の概要は、(図7) に示す。2 個のドラムドライヤは、1,200 φ(mm)×1,000 (mm) 面長が、ヒータリングオイルにより、50~200 (°C) 間にて ±2 (°C) にコントロール可能となっている。2 個のドラムドライヤ間には、V・Rロールが設置されており、付属設備として給気用ファンおよび空気加熱用蒸気ヒータがある。カンバスはストレッチャーによりテンションコントロールが成され、ラインは、0.2~300 (m/min) の範囲において無段変速可能である。実験用湿

図7 実験装置概略図

表3 乾燥実験用布一覧表

品 種	H-3100 (素織ロー A用メッシュ)	S-5500 (素織ロー B用メッシュ)	R-2050 (P.C.)	B-2080 (P.C.)	市川主織 (ニードル フェルト)	日本フェルト (金網)
組 織						
組 成	テロンマルチステ ント一部補強糸系	テロンスパン系 テロン補強糸系 アスベスト系	100%合成マルチ フィラメント	100%合成モノ フィラメント	ウエバ ナイロン ベース (テロン フィラメント)	100%7"ロンス ワイヤ
透 気 度	1,000	8,000	8,000	22,000	970	26,000
サンプ ル						

* $\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2$ at $1/2$ H₂O

(敬儀カンバスR.K.製材による)

紙サンプルとして、公称坪量 600, 400 および 200 (g/m²) のチップボールを各 5,000 枚用意し、油圧ポンプによりニップ圧 50 (kg/cm Max) の線圧が得られるテストプレスにより、加湿サンプルのドライヤ投入状態をコントロールした。

各種カンバスの影響を知るため (表 3) に示した品種を用いた。なお本図中ワイヤは、抄紙機ワイヤパートに用いる 60 メッシュの金網にて、吸水性皆無、通気度大の例とし、またニードルフェルトも参考用として用いた。実験方法は、次の 2 方法により行なった。

(1) サイクルテスト: これは湿紙ウェットベースにて 60 (%) 水分の各坪量のサンプルを、一定速度にて運転中のドライヤ (図 8) の A 点に投入、C 点より取出し、重量計測後再度 A 点に投入する。この一連の動作を一サイクルと呼び、水分率 60 (%) から 5 (%) までに達するサイクル No. (時間) より乾燥速度を算出する。この測定と同時に、我々は熱電対を用い、湿紙中央、ドライヤ側およびカンバス側湿紙表面温度を (図 8) の符号 1~5 の点において計測記録した。

(2) 単一ドラムテスト: これは、前記サイクルテストと同様に、入口水分率を設定、A 点よりサンプル投入後 B 点に達した時点で、ライン運転を停止し、所定時間後、C 点にて取出し計量を行なう。このテストにおいても、同様に前記 3 点の温度経時変化を記録した。これら 2 つの方法にて前記各項実験を行ない検討解析した。ここに概略実験経過および各数値を示す。

3.4 湿紙とドライヤ表面間の熱伝達率 (α kcal/m²·h·°C)

湿紙とドラムドライヤ間の熱伝達率は、湿紙水分率

により変化することは、衆知の事実であるが、一般に湿紙水分率 60~5 % 間の平均熱伝達率値として、150 250 (kcal/m²·h·°C) が用いられ、実際の抄紙機ドライヤパートのドレネージシステムなどが決められている。我々は、前記実験装置を用い、サイクルテストにより湿紙水分率変化に対する、熱伝達率値を求めた。すなわち、湿紙水分率 60% にてドラム表面に圧着を開始し、水分率 5% に達するまでの各サイクルにおいて、湿紙重量、温度を記録、次式により熱伝達率を求めた。

$$Q = A \cdot \alpha (t_D - t_p) \dots \dots \dots (3-1)$$

$$Q = \gamma \cdot (\omega_a - \omega_b) + (t_b - t_a) \{ W_p \cdot C_p + (\omega_a - \omega_b) \cdot C \} \dots \dots \dots (3-2)$$

(3-1, 2) 式より (3-3) 式を導びく。

$$\alpha = \frac{\gamma (\omega_a - \omega_b) + (t_b - t_a) \cdot \{ W_p \cdot C_p + (\omega_a - \omega_b) \cdot C \}}{A \cdot (t_D - t_p)} \dots \dots \dots (3-3)$$

ここで Q: 蒸発および加熱に用いられる総熱量 (kcal/h) A: 接触面積 (m²), t_D , t_p : ドライヤ表面および湿紙中央温度, γ : 水の蒸発潜熱 (kcal/kg), ω_a , ω_b : 各サイクル前後の湿紙重量 (kg/h), t_a , t_b : 各サイクル前後の湿紙中央温度 (°C), C_p , C: 紙および水の比熱 (kcal/kg·°C), W_p : 湿紙の絶乾重量 (kg/h), α : 湿紙ドライヤ間の熱伝達率 (kcal/m²·h·°C) を示す。(図 8) におけるラップ角度およびライン速度より、図中①~⑤の各点間の所要時間が算出される。湿紙速度より判断すれば、①~③点間が加熱、③~⑤点が蒸発とわかる。ドライヤ表面温度は 100~150°C 間の各点においてセットし前記 3 点に関し温度計測を行なっ

図8 実験方法

た結果、熱伝達率算出に用いる t_p は、湿紙中央温度を用いることとした。各サイクルにおける湿紙重量差および温度から、 Q_e (水分蒸発に用いられた熱量)、 Q_s および Q_w (紙および水分加熱に用いられた熱量) を求め、これらの各値を用い各湿紙水分率に対する熱伝達率を算出した。これらの値を (図9) に示す。本図は 600 g/m² 坪量の一例である。湿紙水分率 60~5% 間において 20~700 (kcal/m²・h・°C) の変化を示している。熱伝達率を α 、湿紙水分率を x とすれば、ある条件下においては下式が成立する。

$$\alpha = 0.0045x^3 - bx^2 + 12x - 0.1 \dots\dots\dots (3-4)$$

3.5 湿紙坪量と乾燥速度の関係

これらの関係は単に坪量差のみで比較することは、若干問題がある。すなわち、パルプ特性 (叩解度が大きく影響する) および湿紙の通気度の影響が考えられるが、我々はこれらの要素を除くために、同一叩解度の原料にて抄紙したサンプルを用いた。坪量と乾燥速度の関係を求める前に、湿紙中の水分の状態および乾燥過程について考えて見たい。湿紙に含まれる水分は、次の3種に分けられる、すなわち (a) 機械的に含まれる水分 (b) 毛細管水、(繊維内部および繊維間に存在する水) (c) 組成水 (セルロース結晶の表面吸着水、

図9 ドラム—湿紙間熱伝達率

図10 坪量と乾燥速度の関係

これは普通繊維重量の3~4%位)である。

これら3種の水分が、加熱更に蒸発されるのであるが、これらの過程は、一般に加熱期間、恒率蒸発期間および減率蒸発期間に分けて考えられる。加熱期間において、ドライヤ表面より空気膜を通して湿紙への伝達が行なわれ、これにより温度は上昇する。蒸発は沸騰と異なり、温度にそれほど関係なく起きるが、湿紙は蒸発速度が一定に達するまで加熱される。一定蒸発速度到達後、この速度は変化しない。これを一般に恒率蒸発速度期間と呼んでいる。すなわち湿紙表面に対する水分の移動速度が湿紙表面から空気中への水分蒸発速度が同等の期間である。乾燥が進むにつれて、これら両者の速度関係が変化し、湿紙表面が飽和しなく

図12 ドライヤ表面温度と乾燥速度の関係

なり、蒸発表面が湿紙内部に移動する。このため湿紙表面は過乾燥となり熱伝達量は減少する。更に湿紙中の水分は、蒸気化後繊維中を進み表面に出る必要がある。これらの現象を拡散と呼んでいるが、湿紙厚さが厚い程、拡散速度に対する抵抗が増大し乾燥速度は低下する。これらの事項を考慮し、我々は公称坪量200, 400

および 600 (g/m²) のサンプルを用い、各サンプルに対し水分率60%から5%まで乾燥するのに要した時間を求め乾燥速度を求めた。縦軸に乾燥速度、横軸に坪量を示し、図上に示したのが、(図10)である。図からサンプル200の乾燥速度を1とした場合、400, 600は各々0.9, 0.7となる事が判別できる。乾燥速度(f), 坪量(g)の間に次式が成立する。

$$f = -0.0074g^2 - b \cdot g + 1.06 \dots \dots (3-5)$$

ここで b: 定数を示す。

3.6 ドライヤ表面温度と乾燥速度の関係

図11 ドラム表面温度と乾燥速度の関係

抄紙機ドライヤパートにおいて、湿紙乾燥を行う場合、ドライヤ表面温度を上昇せしめれば、乾燥速度が増加することは一般に知られているが、我々は本実験においてドライヤ表面温度を100～150℃間において10℃毎に変化せしめ、各湿紙水分に対する乾燥速度とドライヤ表面温度の関係を求めた。サイクルテストにより得たデータを、縦軸に湿紙重量、横軸にサイクル No. を記したグラフ上にプロットしたものを(図11)に示す。更に縦軸に乾燥速度(f)、横軸にドライヤ表面温度(t_d)を取り、湿紙水分率60～30%を(a), 30～5%を(c), 60～5%までを(b)とし、グラフ上にプロットしたものを(図12)に示す。これらの図から次の点が判別できる。すなわち、ドライヤ表面温度が上昇するに従って乾燥速度に対する影響度が少なくなる。例えば100℃から110℃の10℃差の乾燥速度への影響は30～40%であるのに対し140℃と150℃では5～20%となっている。原因追求のために、水分率60%から5%間における、湿紙温度の平均値を求め、これを(図13)にプロットした。本図によればドラム温度(t_d)が上昇するにつれ、湿紙温度(t_s)の上昇率は低下している。

図13 ドライヤ表面温度と湿紙平均温度

この2つの関係は、次の3次式にて表わされる。

$$t_s = at_d^3 + 0.074 t_d^2 - 7.46 t_d + 299 \quad (3-6)$$

ここで a は定数を示す。すなわち、恒率蒸発期間においては湿紙温度は100℃を越えることはない。したがってドラム表面温度は上昇しないと考えられる。2番目に判別される点は、湿紙水分率の高い範囲(60～50%)では低い範囲(30～5%)に比して、ドライヤ表面温度への影響が少い。

この現象の原因は、ドライヤから湿紙への熱伝達に対する抵抗値が加熱期間に比して蒸発期間においては、大きいと考えられる。各水分範囲における乾燥速度(f)とドライヤ表面温度(t_d)の関係は、次の各式で与えられる。

$$f_{(a)} = -1.44 t_d^2 + 4.67 t_d - a \quad (3-7)$$

$$f_{(b)} = -0.76 t_d^2 + 3.16 t_d - a' \quad (3-8)$$

$$f_{(c)} = 0.30 t_d^2 + 0.67 t_d - a'' \quad (3-9)$$

ここで a, a' および a'' は定数を示す。

3.7 乾燥速度とカンバステンションの関係

抄紙機ドライヤパートにおいて、一般にはカンバスを用いて、湿紙をドライヤ表面に圧着し乾燥を行なっている。この場合カンバステンションを増加することにより乾燥速度が上昇することは良く知られている。

この理由としては、テンションを増加することにより、湿紙とドライヤ表面間の空気膜が除去され、このために両者間の α 値が増大する。更にウェットエンドにおいては、カンバスの吸水性により湿紙中の水分を機械的に吸収する効果が考えられる。我々は、これらの関係を一連の実験により追求した。条件としてサンプル坪量 600 g/m²、ドライヤ表面温度 100℃、カンバス品種 プラスチックカンバス (以後 P・C と記す) においてサイクルテストを行ない、カンバステンションを 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, および 4.0 (kg/cm) と変化せしめ、乾燥速度との関係を求めた。

実験により得たデータを縦軸に乾燥速度(f) 横軸にカンバステンション (C_t) を示したグラフ上にプロットしたものを(図14)に示す。

図14 乾燥速度とカンバステンションの関係

図から各カンバステンションに対する乾燥速度を見れば、今2.0を1とすると、0.75, 1.0にて各々30, 10%低下、3.0および4.0にて5.7%を増加している。これらの関係は次式で与えられる。

$$f = -0.036 C_t^2 + 0.25 C_t + a \quad (3-10)$$

ここで a は定数を示す。

(図14) からカンバステンション2～3 (kg/cm) 間に限界テンションが存在することが判かる。これは、湿紙とドライヤ間の空気膜を機械的に取除き得る限界があると考えられる。一方湿紙温度に注目して見ると

カンバステンションを2.0から4.0 kg/cmと1.0ごとに上昇せしめるにしたがって、各々71.4, 76.4および78.0°Cと変化している。これらの結果からカンバステンションを2.0 kg/cm以上にて運転することは、乾燥能力増加率と機械構成要素とを対比した場合、大きな優位性は見い出せない。

3.8 乾燥速度とカンバス品種の関係

抄紙機ドライヤパートに使用するカンバス品種に関しては、抄物、使用箇所、カンバス乾燥装置などに関連してこれまで各種の検討がなされているが、我々は、乾燥速度の観点から検討を加えるため、各種実験を行った。

衆知のごとくドライヤパートにおけるカンバスの乾燥に寄与する特性として「吸水性」および「通気性」がある。抄紙中のマシンにおいては、これら2つの要素が互いに影響し乾燥速度を決定している。ここで我々が試みた各種の実験結果を記す前に、カンバスの特性に関し若干の検討を加えて見たい。カンバスの品種は大きく分けてP・Cと綿カンバス（以後本文中ではC・Cと記す）の2種があげられる。（最近これら2種の外にアスベストカンバスおよびドライフェルトがあるが、我々の実験では、これらも含めて検討を加えている。）

P・Cは一般に通気度8,000~25,000 (cc/min/cm² at 1/2" H₂O) を有する合成繊維製カンバスを指すもので、乾燥においては本質的にC・Cと全く同じであり、更にP・Cの特長を加味したものと考えられる。P・Cの特長としては、通気性が良好であること、吸水性がほとんど無いこと（疎水繊維のため糸自身は吸水しない、このためドライヤパートの使用場所によっては欠点となる場合もある）、寸法安定性が良好であることなどが考えられるが、これらの中で特に通気性においてC・Cに比し大きな差異が見られる。

実際の抄紙機に高通気度のP・Cを用い抄紙した場合、抄速に対し適当な通気度を選定するならばカンバスのポンピングアクションによりドライヤポケット内

に給気され、このため一般にはP・CがC・Cに比して乾燥に与える効果は大きいと考えられているが、我々はこれらの関係を確認するために、サイクルテストおよび単一ドラムテストを行なった。

使用湿紙サンプルは、坪量200, 400および600 g/m², ドライヤ表面温度100~150°C, カンバステンション0.75~4.0 kg/cm, カンバス品種C・C（熱風ロール用カンバス, H-3100）, アスベストカンバス（熱風ロール用S-5500）およびP・C（R-2050）を用いた。サイクルテスト結果の一例を（表4）に記す。

（表4）に示すごとく、P・Cの乾燥速度を1とすれば、アスベストカンバスは2.2%, C・Cにおいては18.3%の増加を示している。これらの実験結果は、我々の一般的知識に相反していることは非常に興味深いことである。これらの現象の原因を追求するため我々は各種検討および実験を加えた結果、これらの原因はカンバス本体の含水率に関係があることが判明した。すなわち今回の実験ではカンバスはすべて風乾状態にてテストを行なったが、実機においては、計測データによれば5~25%含水率状態にて抄紙されている。この差異がこのような結果として示されたものとする。現在我々は、これらの関係を明確にするために、特別に設計されたカンバス加湿装置および水分計の併用にて実験を継続している。本件に関する詳細報告は別紙に記す予定であるが、これらの検討結果は、実機においての使用カンバス品種の選定、カンバス乾燥装置などの選択のための一つの指針を示していると思われる。

3.9 乾燥速度とカンバス品種（通気度）の関係

前項の実験結果から、カンバスの特性である吸水性および通気性の各々が乾燥速度に与える度合を確認するためには、別個の実験方法を用い、これら2つの結果から最高乾燥速度を得るための基とする必要性が認められた。我々は、これらを確認するため、吸水性が低く通気度の異なる数種のカンバスおよび相当品を用い実験を行なった。用いた試料は、ワイヤ（60メッシュ、抄紙機長網部に用いるもので通気度28,000）、P・C（R-2050通気度8,000）、P・C（B-2080、通気度22,000）およびドライフェルト（ウェブ、ベース共ナイロン・テトロンにて、通気度970）である。使用した湿紙サンプルはこれまでと同様に、200, 400および600 (g/m²) で、ドライヤ表面温

表4 乾燥速度とカンバス品種の関係 単位 (g/sec)

カンバス 品種 サンプル 坪量(g/m ²)	プラスチック カンバス	アスベスト カンバス	コットン カンバス	備 考
200	0.51	0.54	0.60	ドラム温度 100°C テンション 2.0kg/cm ライン速度 5 m/min
400	0.44	0.46	0.49	
600	0.31	0.32	0.39	
平 均	0.401 P・C=1の場合 の値を()に示	0.413 (1.022)	0.478 (1.183)

図 15 乾燥速度と通気度の関係

度 100°C, カンバステンション 2.0 kg/cm であった。最初サイクルテストにてテストを行なったが蒸発水分量の大部分がフリーランに相当する計量部において放出されたために明確な差異は確認できなかった。そこで我々は、単一ドラムテストによりこれらの関係を追求した。

これらの結果は、通気度が一定値を越えた時点より乾燥速度が増大することを示している。ここでドライヤ表面温度と湿紙温度との差に注目して見れば、通気度大にて温度差大を示している。すなわち通気度大の

場合は湿紙よりの蒸発促進が大となり、この結果湿紙温度が低下する。今ドライヤ表面温度一定であるため温度差は増加する。これらの関係をサンプル重量別にグラフ上にプロットしたものを(図 15)に示す。なお乾燥速度(f)と通気度(p)の間には次式が成立する。

$$f_{(200)} = ap^2 - 0.0033p + 0.51 \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

$$f_{(400)} = a'p^2 - 0.0025p + 0.3 \quad \dots\dots\dots (3-12)$$

$$f_{(600)} = -a''p^2 - 0.0006p + 0.3 \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

ここで () 内は湿紙サンプル重量, a , a' および a'' は定数を示す。

4. 結 言

以上抄紙機ドライヤパートにおける、湿紙乾燥メカニズム解析の概略を紹介したが、我々は現在も乾燥速度とカンバス含水率、フリーネスおよびドライヤポケットコンディションとの関係等に関し各種実験解析を継続し、これら数式の充実化を計っている。我々は今後これら数式を用いることにより、稼動中抄紙機ドライヤパートの計測データより、最適乾燥条件を得るための改良箇所の発見、さらには新設抄紙機ドライヤパートの各機器要素の適正値の選定などに活用する所存である。

これらの結果は今後この分野に大きく寄与していくことを確信するものである。終りに、本実験の際、終始援助鞭撻を頂いた、数島カンバス株式会社八幡工場、森工場長および技術課諸氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 桐栄良三編：乾燥装置（日刊工業，昭 41）
(原稿受付 48. 6. 27)

新 刊 紹 介

書 名; An Introduction to Paper Industry Instrumentation
著 者; John R. Lavigne
価 格; 15 ドル
頁数及びサイズ; 456 ページ, 6 $\frac{1}{4}$ " × 9 $\frac{1}{4}$ ", 図, 表, 写真入り
注文先; Miller Freeman Publications Book & Directory Depart 500 Howard Street, San Francisco, Calif. 94105, U. S. A.

新 刊 紹 介

書 名; 1974 Pulp and Paper Mill Map (U. S. A. and Canada)
発行所; Miller Freeman Publications
価 格; \$ 10.50
サイズ; 42" × 29"
注文先; Miller Freeman Publications Book & Directory Department 500 Howard Street, San Francisco, Calif. 94105, U. S. A.