紙の蒸気加熱過程における凝縮熱伝達特性に関する実験的研究*

川 水 努^{*1}, 金 子 毅^{*2}
鈴 木 節 夫^{*3}, 鶴 田 隆 治^{*4}Experimental Study on Condensation Heat Transfer Characteristics
of Paper in Steam Heating ProcessTsutomu KAWAMIZU^{*5}, Takeshi KANEKO,
Setsuo SUZUKI and Takaharu TSURUTA^{*5} Machinery Plant Laboratory, Hiroshima Research and Development Center,
Mitsubishi Heavy Industries, LTD.,
4-6-22 Kan-on-shin-machi, Nishi-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 733-8553 Japan

The steam heating experiments are carried out with using the handsheet. Effects of suction pressure and permeability of paper on condensation heat transfer characteristics are studied. We measure temperature distribution in the direction of paper thickness and energy absorption in the paper is estimated. Experimental results show that suction pressure enhances the energy absorption in the paper and decreases temperature difference in the paper-thickness direction, and effects of the suction pressure strongly appear in high permeability paper. Experiments also indicate that the absorbed energy rate is decreased with increasing in the steam heating time. In the case of low permeability paper, influence of internal condensation disappears immediately and the conduction dominates the heat transfer in the paper, which indicates that increasing in moisture content prevents steam flow into the paper. On the other hand, in the case of large suction pressure and high permeability paper, results show that the paper is heated rapidly due to the internal condensation.

Key Words: Porous Media, Condensation, Mass Transfer, Heat Transfer Enhancement, Experiment, Paper

1. 緒 言

紙を工業的に大量生産する製紙機械では、植物繊維を含んだ原料が水分率 99%程度の割合で供給される。吸引工程、圧搾工程、乾燥工程により、原料濃度が高められ、最終的には水分率 5%程度の状態となる。ホットプレッシングは、紙の温度を高め、紙中水分の粘性を低くすることにより、圧搾時の脱水量を増加させる手法である。生産速度向上、乾燥工程の負荷低減、ならびに機長短縮を狙いとして適用が推進されている。このホットプレッシングを実施する目的で紙の蒸気加熱が実施されており、加熱能力および効率向上を狙ってサクシオンボックスと呼ばれる負圧室を蒸気供給部の反対側に設置し、紙内部への蒸気流入を促進している設備もある。Patterson ら⁽¹⁾は、本技術に関連する論文のレビューを行い、現象の支配因子が解明されていないことを指摘した。そして、彼らは蒸気供給部とサ

クシオンボックスを固定し、紙をそこへ搬送する方式の蒸気加熱実験を実施し、その加熱特性を評価した⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。紙の透過率が入熱量を支配することを明らかにしたが、蒸気加熱にともなう水分率の増加などがその加熱特性におよぼす影響については評価されていない。また、彼らの実験では紙の走行にともなう蒸気加熱部への不凝縮性ガスの流入とサクシオン圧力変動の影響が懸念される。本研究では、不凝縮性ガスの流入、サクシオン圧力変動の影響を極力排除した実験を実施し、紙の蒸気加熱特性に対するサクシオン圧力、透過率の影響を評価するとともに、蒸気加熱過程で生じる水分率の増加などが加熱特性におよぼす影響を実験的に明らかにした。

2. おもな記号

C_p, C_g : 水比熱, 繊維比熱 (=1300)	J/(kg·K)
Da : ダルシー数	
h_g : 凝縮潜熱	J/kg
k : 透過率	m ²
L : 代表寸法 ($=l_p$)	m
m_p, m_f : 湿紙内の水分質量, 繊維質量	kg/m ²
ΔP : 差圧	Pa

* 原稿受付 2006 年 4 月 17 日。

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)技術本部 (〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22)。^{*2} 学生員, 九州工業大学大学院工学研究科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1) [現: 三菱重工業(株)技術本部]。^{*3} 三菱重工業(株)紙・印刷機械事業部。^{*4} 正員, 九州工業大学工学部。

E-mail: tsutomu_kawamizu@mhi.co.jp

Q : 単位面積当たり入熱量	J/m^2
$\dot{Q}$: 平均入熱速度	W/m^2
$\bar{Q}$: 80%入熱までの平均入熱速度	W/m^2
$\dot{Q}'$: 入熱速度	W/m^2
T : 温度	$^{\circ}\text{C}$
t_p : 湿紙厚さ	m
u_0 : 見かけの速度 [式(2)参照]	m/s
x : 上面からの距離	m
ϕ : 水分率 (湿紙質量基準) [式(3)参照]	
μ : 粘度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ : 密度	kg/m^3
π_1 : 蒸気駆動力の無次元数	
π_2 : 入熱速度の無次元数	
π_2' : 平均入熱速度の無次元数 (80%入熱)	

添え字

- g : ガス
 i : 初期値
 v : 蒸気

3. 実験装置および実験方法

供試湿紙に透過率の異なる 2 種類の紙(新聞原料の手漉き紙(以下新聞紙), 上質紙原料の手漉き紙(以下上

Fig.1 Experimental apparatus
Thermo couple (K type)
Thin paper (15g/m^2)

Fig.2 Detail of test piece

質紙))を用いて、図 1 に示す実験装置で蒸気加熱実験を実施した。絶乾質量 100g/m^2 , 200g/m^2 の供試湿紙を幅 125mm , 長さ 125mm , 絶乾質量 25g/m^2 の手漉き紙を重ねて作成した。絶乾質量は、紙を 110°C にして 2 時間空気中で乾燥させて測定される質量である。図 2 には供試湿紙の形状ならびに熱電対での温度測定位置を示す。線径 $25\mu\text{m}$ の K 型熱電対(被覆無し)を湿紙厚さ方向 $x/t_p=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の位置に設置し厚さ方向の温度分布を測定した。 x は湿紙上面からの距離, t_p は湿紙厚さを示す。上面, 下面に設置する熱電対は、約 15g/m^2 の薄紙を 2mm 幅に切り、熱電対の测温接点と前後 2mm ずつあけ、薄紙と湿紙とを張り合わせることで固定した。供試湿紙は 1.37MPa の面圧で 5 分間プレスされ、各層ならびに上面・下面の熱電対が密着・固定されている。

供試湿紙は、水分率調整後、サクシオンボックス上に設置される(図 1)。供試湿紙の水分率は、設置作業中と蒸気加熱前の初期サクシオン負荷時に低下するため、予め校正曲線を取得し、設置前に水分減少量を考慮した水分率を与えた。初期サクシオン負荷後、湿紙厚さ方向に水分分布が生じていないことを実験により確認している。

図 3 にはサクシオンボックス上での供試湿紙の設置状態を示す。サクシオンボックス上面中央に幅 50mm , 長さ 50mm の開口部が有り、ここにサクシオンが作用する。供試湿紙の変形を防止する目的で下面に多孔板とフェルトを設置した。フェルトは紙に対して十分透過率の大きいものを用いている。供試湿紙へサクシ

Fig.3 Schematic of test section

ン作用部以外から蒸気・空気が流入するのを防ぐため、樹脂製シートを設置し、その上にテストセクション周囲で生じた凝縮水の流入を防ぐための濾紙を置いて金属製のカバーで固定した。外部に導出した熱電対はテープで絶縁・固定し、サンプリング速度 200Hz で湿紙内温度分布の測定が行われた。あわせて供給蒸気温度、サクシオンボックス内圧力の測定も実施した。

ボイラーで発生した蒸気は(図 1)、配管を通して蒸気ノズル(100mm×100mm)から湿紙上面へ供給される。蒸気ノズル内部には整流板が設置されており、一様流が形成されている。蒸気ノズルは実験時のみの蒸気加熱を実施するため、リニアガイド上を図 1 の紙面方向に約 500mm/s で移動する。また、供給蒸気流量は、蒸気加熱により消費される蒸気量よりも十分に多い 9.0kg/hr とした。配管内での蒸気の凝縮を防ぐため、配管にヒーターを巻き、その外周を断熱材で覆った。これにより、供給蒸気は 103～110℃の過熱蒸気となっている。

サクシオンボックスは(図 1)、真空ポンプを用いて予めバッファタンク内を設定圧力まで減圧し、実験時に電磁弁を開くことで負圧にされる。バッファタンクは蒸気加熱実験中(約 30s)にサクシオンボックス内圧力が一定となるよう十分大きな容積のものを使用した。

実験は供給蒸気の温度が安定したことを確認したあと、バッファタンクを目標圧力に減圧して電磁弁を開き、約 10s 後にサクシオンボックス内が目標圧力となった時点で、蒸気ノズルを湿紙上部に移動して実施した。加熱前にサクシオンを作用させることにより、湿紙内に定常圧力分布が形成された状態からの蒸気加

熱実験が行われる。

表 1 に実験条件を示す。湿紙への蒸気流入量の違いが凝縮熱伝達特性におよぼす影響を評価することを目的として湿紙の透過率(紙種：新聞紙、上質紙)と湿紙厚さ(絶乾質量：上質紙 100g/m², 200g/m²)を供試湿紙の実験パラメータとした。装置側の実験パラメータはサクシオン圧力とした。なお、初期水分率は製紙機械においてホットプレッシングが実施される水分率を考慮して 55%とした。

4. 紙の透過率と紙厚

サクシオン作用時は、流入した蒸気が湿紙内部で凝縮するので、入熱速度は蒸気流入量によって変化することになる。透過率は蒸気流入量に影響をおよぼす重要な値であり、湿紙への入熱速度を決定するパラメータの一つとなる。本実験で適用する差圧においては、湿紙中の気体の流れは粘性支配であり、ダルシー則に従うと考えられる。このことから、次式を用いて湿紙の透過率 k を評価した。

$$k = \frac{\mu_g u_0 t_p}{\Delta P} \quad (1)$$

ここで、 u_0 は気体の見かけの速度であり、次式より求める。

$$u_0 = \frac{\text{通過気体体積流量}}{\text{紙の面積}} \quad (2)$$

蒸気加熱実験に用いた紙と同一の手漉き紙を用いて、水分率と透過率、水分率と湿紙厚さの関係を測定した。図 4 に新聞紙と上質紙の透過率測定結果を、図 5 には絶乾質量 50g/m² での水分率と湿紙厚さ t_p の関係

Fig.4 Permeability of paper

Fig.5 Paper thickness

Table1 Experimental conditions

Grade	Basis weight [g/m ²]	Number of thermo couples	Initial moisture content ϕ [-]	Suction pressure (Gauge)[kPa]
News print	100	5	0.55	0, -25, -46
Fine paper	100	5	0.55	0, -5, -15, -25
	200	5	0.55	0, -5, -15, -25

を示す。透過率は与えられた差圧 ΔP における通過空気流量を測定し、湿紙厚さを用いて式(1)(2)から求めた。紙の通過気体体積流量、厚さ計測法はJIS⁽⁶⁾に規定されており、恒温恒湿の室内で計測を行った。また、本報で用いた水分率は次式で定義される。

$$\text{水分率}\phi = \frac{\text{湿紙質量} - \text{絶乾質量}}{\text{湿紙質量}} \quad (3)$$

紙は植物繊維から構成されており、水を吸収しやすく、水分率により厚さが変化する(図5)。上質紙の場合、水分率44%付近までは水分率の増加にともない厚さが厚くなるが、水分率44%以降はその勾配がゆるやかになる。水分率44%までは供給された水が繊維内に取り込まれ、繊維が膨潤して湿紙が厚くなるのに対し、44%以上の水分領域では繊維内に吸収されず、供給された水は繊維間の空隙内に保持されるようになるためと考えられる。この繊維内に水を吸収できなくなる水分率を繊維飽和点(Fiber saturation point)と呼ぶ⁽⁶⁾⁽⁷⁾。繊維飽和点までは繊維が膨潤し、繊維間の空隙が増すため、図4に示されるように上質紙では水分率の増加にともない透過率が上昇する。一方、新聞紙では繊維飽和点以下の領域で湿紙厚さの変化は少なく(図5)、透過率もほとんど変化していない(図4)。繊維飽和点以上では空隙内に水が保持され、ガスの流動が妨げられるために上質紙、新聞紙とも透過率は水分率の増加によって低下する。繊維飽和点以下の領域で、透過率ならびに厚さに対する水分率の影響が2種の紙で異なっているのは、紙を構成する植物繊維等の特性の違いに起因するものであると考えられる。表2に実験に用いた新聞紙、上質紙の湿紙厚さ、バルク密度、バルク比熱、バルクの熱伝導率、繊維飽和点および透過率を示す。実験に用いた2種類の紙では、透過率に大きな違いがあるのが特徴である。厚さの差は小さくバルク密度の差も小さい。バルクの熱伝導率は初期水分率55%の領域では水の熱伝導率が支配的であり、密度差も小さいことから紙種による差異はほとんど無いと考えられる。ここでは、Nederveenの測定結果⁽⁸⁾を定式化した式⁽⁹⁾から値を予測したものを示した。初期水分率55%で蒸気加熱実

験を行うため、水分率は繊維飽和点以上の領域にあり、蒸気加熱にともなう水分率の増加によって透過率は減少する。

5. 実験結果と考察

5.1 入熱量評価方法 蒸気加熱される湿紙の温度変化を測定し、その測定値を用いて、以下に示す方法で入熱速度、入熱量の評価を実施した。

Fig.6 Calculation method of absorbed energy

供試湿紙1層の拡大図を図6に示す。時刻 t における湿紙の上面、下面、それぞれの温度を T_i' 、 T_{i+1}' とし、この層の代表温度 $\bar{T}_i'$ を次式であらわす。

$$\bar{T}_i' = (T_i' + T_{i+1}')/2 \quad (4)$$

Δt 時間内における入熱量 Q_i' [J/m²]は、

$$Q_i' = (C_{p_i} m_i + C_{p_f} m_f) (\bar{T}_i'^{\Delta t} - \bar{T}_i') \quad (5)$$

であらわされる。ここで水分質量 m_i は初期水分率における値を用いた。 m_f は繊維質量、 C_{p_i} は水の比熱、 C_{p_f} は繊維の比熱である。 Δt 時間内における湿紙全体の入熱量 Q' [J/m²]は、各層に対して求めた Q_i' を紙の積層枚数分だけ積分して求められる。また、入熱速度 $\dot{Q}'$ [W/m²]は Q' を Δt で除せばよい。

$$Q' = \int_{x=0}^x Q_i' dx = \sum_{i=1}^n Q_i' \quad (6)$$

n : 湿紙積層枚数

$$\dot{Q}' = \int_{x=0}^x Q_i' dx / \Delta t = Q' / \Delta t \quad (7)$$

加熱開始から時刻 t までの全入熱量 Q は、 Q' を時間積分することで得られ平均入熱速度 $\dot{Q}$ は Q を t で除すことで得られる。

$$Q = \int_0^t Q' dt = \sum_{i=0}^i Q' \quad (8)$$

$$\dot{Q} = Q/t \quad (9)$$

Table2 Characteristics of paper

Grade	News print	Fine paper
Basis weight [g/m ²]	100	100, 200
Paper thickness t_p [μm], $\phi=0.55$	300(100 [g/m ²])	280(100 [g/m ²]) 560(200 [g/m ²])
Density (Bulk) [kg/m ³], $\phi=0.55$	740	793
Specific heat (Bulk) [J/(kg·K)], $\phi=0.55$	2893	2893
Thermal conductivity (Bulk) [W/(m·K)], $\phi=0.55$	0.456	
Fiber saturation point ϕ	0.383	0.438
Permeability k [m ²], $\phi=0.55$	8.43×10^{-15}	1.02×10^{-13}

5・2 実験結果 図7に新聞紙、上質紙のサクシオン圧力(ゲージ圧)0, -25kPaにおける温度分布の実測値と入熱速度 $\dot{Q}'$ の評価値を示す。サクシオンが作用しない、すなわち熱伝導のみで湿紙内部に熱が伝えられる場合[(a),(c)], 温度分布、入熱速度に紙種による違いがないことが示された。サクシオン圧力-25kPaを作用させた場合[(b),(d)], サクシオンが作用しない実験に比べて、加熱開始から下面が温度上昇を開始するまでの

時間遅れが短くなった。また、加熱開始0.1s後の紙厚方向の温度差が小さくなっている。サクシオン作用時の湿紙の温度は、蒸気供給面である上面側から順次上昇しており、下面の温度上昇が始まる前に厚さ方向 $x/t_p=0.25$ 位置の温度はほぼ定常値に近い値に達している。湿紙内に流入した蒸気は、各位置の温度を圧力に対応した平衡温度まで上昇させつつ、上面から下面に向かって凝縮領域を拡大させていることを示すもので

Fig.7 Temperature profile and absorbed energy rate

ある。そして、サクシオン作用時の定常状態下での上質紙の温度は、紙厚方向各位置での圧力に対応した蒸気の平衡温度となっている。図 7(d)において加熱開始 0.5s 後の湿紙温度は、 $x/l_p=1.0$ の位置でサクシオン圧力 -25kPa に対応した蒸気の平衡温度 92.2℃と実測値がほぼ等しい。入熱速度は、加熱開始直後に最大値があらわれ、その後時間とともに低下している。加熱が進むにつれ湿紙内部で凝縮にともなう水が増え、水分率が上昇して透過率が低下することおよび圧力損失が発生する凝縮領域が拡大することに起因するものである。また、新聞紙と上質紙にサクシオン圧力-25kPa を作用させた場合[(b),(d)], 入熱速度の最大値は新聞紙より上質紙の方が約 3 倍大きい。上質紙の透過率が新聞紙に比べて大きいためである。新聞紙では、加熱開始後 0.1s 付近から入熱速度はサクシオンが作用しない場合の値とほぼ等しくなる。新聞紙の場合、0.1s 以降は蒸気流入による加熱の促進効果が小さく、湿紙内部はサクシオンの作用しない場合と同様に熱伝導のみで上面から加熱されていると考えられる。一方、上質紙では、湿紙全体が定常温度に達するまで入熱速度が速い。蒸気が下面付近まで到達し、下面付近も蒸気によって直接凝縮加熱されているためと考えられる。このことから、同一サクシオン圧力を作用させた場合、透過率の高い上質紙の方がサクシオンの効果が高いことが明らかになった。

5・3 サクシオン圧力と入熱量 図 8 に加熱開始から 30, 50, 100ms までの湿紙への入熱量 Q とサクシオン圧力の関係を示す。前述したようにサクシオンが作用しない場合、各時間において新聞紙と上質紙の入熱量はほぼ等しく、紙種による差異はない。サクシオンを作用させた場合、新聞紙、上質紙ともにサクシオン圧力の増加にともなって湿紙への入熱量が上昇する。サクシオン圧力に対する入熱量の増加は、新聞紙より上質紙の方が大きい。また、新聞紙に上質紙の約 10 倍のサクシオン圧力を作用させると(新聞紙: -46kPa, 上質紙: -5kPa), 30ms, 50ms 後での入熱量はほぼ等しいが、100ms 後においては上質紙のほうが多い。初期水分率 55%における上質紙の透過率が新聞紙より約 10 倍大きい(表 2), 新聞紙に作用するサクシオン圧力が約 10 倍上質紙に対して大きい場合、加熱開始直後(30, 50ms)では新聞紙と上質紙で蒸気流入量・入熱量がほぼ等しくなる。その後、水分率が上昇して透過率が低下する際に、新聞紙は上質紙より水分率増加による透過率の低下割合が大きく、蒸気流入量の減少割合も高いため 100ms 後の入熱量が少なくなったと推定される。

Fig.8 Relation between suction pressure and absorbed energy (100g/m²)

5・4 無次元数による実験結果の整理 以下に示す無次元数を用いて実験結果の整理を行った。本無次元数は、次報⁽¹⁰⁾において報告する数値解析モデルの基礎式から導出されたものである。詳細については解析結果とあわせて次報で報告を行う。

$$Da \cdot \pi_1 = \left(\frac{k_i}{L^2} \right) \left(\frac{\rho_v L^2 \Delta P}{\mu_v^2} \right) \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{L \dot{Q}'}{\mu_v h_{fg}} \quad (11)$$

$$\pi_2' = \frac{\bar{L} \bar{Q}}{\mu_v h_{fg}} \quad (12)$$

Da 数は透過率の無次元数で、紙の通気抵抗をあらわし、 π_1 は差圧 ΔP (大気圧 - サクション圧力) による多孔質体内での蒸気駆動力をあらわす。 k_i は初期透過率、 L は代表寸法 (= 湿紙厚さ t_p) である。ここで Da 数と π_1 の積は式(10)、湿紙の蒸気流入に対する抵抗力と駆動力の比となり、蒸気の流入のしやすさを示す無次元数となる。 π_2 (式(11)) は湿紙への入熱速度をあらわす無次元数である。ホットプレッシングの脱水促進効果ならびに紙品質への影響が実験的に評価されている高温側の温度領域⁽¹⁾ (80℃以上) を考慮して 80% 入熱までの平均入熱速度をあらわす無次元数 π_2' を式(12)で定義した。 $\bar{Q}$ は湿紙を定常温度まで昇温するために必要な熱量の 80% が入熱するまでの平均入熱速度、 h_{fg} は凝縮潜熱である。図 9 に $Da \pi_1$ と π_2' の関係を示す。上質紙については、絶乾質量 200g/m² での実験結果もあわせて図中に示した。サクション圧力は、新聞紙 0, -25, -46kPa, 上質紙 0, -5, -15, -25kPa である。

$Da \pi_1$ が大きいほど平均入熱速度は速くなる。 $Da \pi_1$ が大きくなることで、湿紙内への蒸気流入量が増加するためである。新聞紙は上質紙に比べて Da 数が小さく、サクション圧力を大きくしても $Da \pi_1$ が上質紙ほど大きくならないことから、サクションの効果を得にくいことがわかる。新聞紙 -46kPa と上質紙 -5kPa では $Da \pi_1$ がほぼ等しく (1.1 ~ 1.2)、80% 入熱までの平均入熱

速度の無次元数 π_2' を比較すると、図 8 で示した加熱 100ms 後までの入熱量と同様に上質紙のほうが速い。これは前述したように加熱の進行とともに湿紙内部の水分率が上昇した際の、透過率の低下が上質紙に比べて新聞紙のほうが大きいためであると推測される。また、上質紙、絶乾質量 100g/m², 200g/m² に対する無次元数整理結果から同一の紙種においては、絶乾質量にかかわらずサクション作用時の平均入熱速度 π_2' が $Da \pi_1$ を用いて整理できることが図 9 に示されている。

湿紙内への蒸気の流入のしやすさをあらわす無次元数 $Da \pi_1$ がサクションを用いることによる入熱速度向上効果の指標の 1 つとなることが明らかになった。

6. 結 論

透過率の異なる 2 種類の紙を用いて蒸気加熱実験を実施し、紙厚方向の温度分布の変化を測定した。また、温度変化から入熱速度、入熱量を求め、以下のことがわかった。

- (1) サクションを作用させると入熱速度が上昇し、同一サクション圧力では、透過率が高いほど入熱速度が速い。
- (2) 今回の実験に用いた新聞紙のように透過率が低い紙では、サクション作用時において、加熱開始初期のみ、蒸気流入にともなう内部での凝縮加熱が行われ、その後は熱伝導による加熱へと移行する。
- (3) 今回の実験に用いた上質紙のように透過率が高い紙では、サクション作用時において、紙が蒸気加熱時の定常温度に達するまで蒸気流入にともなう内部凝縮で加熱される。
- (4) サクションを作用させたとき、入熱速度は加熱開始直後に最大値を示し、その後、時間の経過とともに低下する。加熱が進むにつれて、紙内部の水分率が増加して透過率が低下すること、および圧力損失が発生する凝縮領域が拡大するためである。
- (5) 湿紙内への蒸気の流入のしやすさをあらわす無次元数 $Da \pi_1$ がサクションを用いることによる入熱速度向上効果の指標の 1 つとなる。

本研究の遂行にあたり熱心に協力頂いた九州工業大学大学院生 平野 宏君、学部 4 年生 長井 博之君(当時)に心から謝意の意を表す。

Fig.9 Relation between $Da \pi_1$ and π_2'

参考文献

- (1) Patterson, T. and Iwamasa, J., Review of Web Heating and Wet Pressing Literature, *TAPPI 99 Proceedings*, (1999), pp. 1255-1278.
- (2) Patterson, T. et al., An Apparatus for the evaluation of web-heating technologies - Development, capabilities, preliminary results, and potential uses, *TAPPI JOURNAL MARCH 1996*, pp. 269-278.
- (3) Patterson, T. and Iwamasa, J., Steambox Comparator Experiments: Apparatus Validation and Investigation of Steambox Performance, *1999 TAPPI Engineering/Process and Product Quality & Trade Fair*, pp. 621-635.
- (4) Patterson, T., An investigation of factors affecting steambox heating effectiveness, *TAPPI JOURNAL SEPTEMBER 2002*, pp. 8-12.
- (5) Japan Industrial Standard, P 8117, P 8118.
- (6) Kadoya, T. et al., *SCIENCE OF PAPERMAKING*, (1982), p. 94, CHUGAI SANGYO CHOSAKAI.
- (7) Karlsson, M., *Paper making Part2, Drying*, (2000), pp. 54-83, Fapet Oy, Finland.
- (8) Nederveen, C.J. and Finken, J.G., THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT ON WET PAPER SAMPLES AT HIGH TEMPERATURES, *DRYING TECHNOLOGY*, Vol.10 (1) (1992), pp. 189-198.
- (9) Hoshi, Y. et al., Prediction of Temperature and Moisture Content Profiles of Paper in Drying Process, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.625 (1998), pp. 281-288.
- (10) Kawamizu, T. et al., Analytical Study on Condensation Heat Transfer Characteristics of Paper in Steam Heating Process, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.727 (2007), pp. 823-830.