紙層内の熱物質移動と紙変形に関する研究

Study on Heat and Mass Transfer in Paper Layer and Deformation of Paper

技術本部　久野広明*1　原田昌博*2
真田晃*3　横尾和俊*4
三原製作所　大平和仁*5

抄紙機ドライヤでは蒸気ドラム間のフリーラン部において，端部の拘束力が弱いため，紙端部では乾燥による収縮量が大きい．そのため，抄紙機の端部の紙は，印刷時の湿し水により伸びが大きく，ファンアウトと呼ばれる印刷障害を起こしやすい．また，蒸気ドラム上では紙層内の熱物質移動によって，表裏に水分差が生じ，それによる収縮差をカンバスでの拘束により抑制するため，乾燥による内部応力が発生する．この内部応力は加湿，脱湿によって解放され，それに伴ってカールが発現する．フリーラン部の乾燥抑制と蒸気ドラム上でのカンバス越し熱風乾燥の併用で紙端部の収縮率を2％以下に，カールを10（1/m）以下にできる紙変形防止技術を提案した．

The steam-heated cylinder dryer section of paper machines causes shrinkage of paper magnify at the edge in the free run due to low restraint. When the paper at the edge is printed, it causes serious printing problems, that is fan-out. This is due to elongation by dampening. On the other hand, the moisture difference between top and bottom layers of paper generates an inner stress in the sheet on a steam drum because of varying levels of dryness of the paper. When the inner stress is released, the paper curls due to humidification. It is proposed that the edge shrinkage can be reduced to under 2 % by preventing drying during free running and improving drying on the steam-heated drum, using a drying method which reduces curl within 10 m^{-1}.

1．まえがき

紙の抄造工程の一つであるドライヤ部では，紙は水分率約55％から5％まで乾燥される．この過程で繊維中の水が蒸発除去される際，繊維の収縮が起り，拘束状態の違いによって幅方向に収縮率の異なる紙が出来上がる．また，紙層内では加熱面から蒸発面に向かって水や水蒸気が移動することで表裏に水分差が生じる．これが表裏の収縮差となってカールが発生する．抄紙機では，これらの変形が最小になるよう，蒸気ドラム上ではカンバスで紙を押え拘束し，蒸気ドラム間では真空ロールを配し，真空吸引により紙を拘束しながら乾燥している．紙層内の熱物質移動の過程で発生する内部応力の程度の大小は，製品としての紙の伸縮特性やカールなどの紙変形に大きな影響を与える．紙の変形防止はますます高速化している新聞輪転機での走行安定性や印刷品質の維持向上のためにはもちろんのこと，情報化社会の発展とともに増加しているパーソナルユースのプリンタや複写機での紙詰りなどのトラブル防止を図る上でも重要となっている．筆者らは熱物質移動と紙変形のメカニズムを明らかにするとともに，拘束乾燥と紙変形の関連を定量化し，その変形防止法を提案した．

2．紙層内の熱物質移動と紙変形メカニズム

抄紙機における紙の乾燥の方法は，紙を蒸気シリンダドラムに接触させ，カンバスと呼ぶ通気性の高い耐熱合成布で拘束しながら水を蒸発させる．蒸気ドラム間は真空ロールによって，1～2 kPaの面圧相当になるよう紙を真空吸引により拘束し，蒸発蒸気を吸引する．図1に紙の拘束乾燥のモデル[1]を示す．

2．1　水分蒸発に伴う寸法変化

紙は水の蒸発とともにネットワークを形成している繊維の収縮によって寸法変化を起す．一般に紙の繊維は紙幅方向（*CD*）より紙走行方向（*MD*）に多く並んでいるため，寸法変化には異方性がある．通常，乾燥による*CD*の収縮は*MD*のそれに比べ，2～3倍になる．抄紙機ドライヤ部において，収縮$\Delta\varepsilon$により発生する紙層内の応力σは次のように表せる．

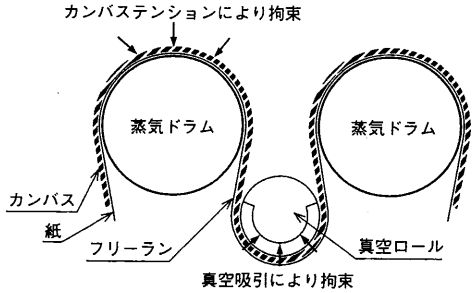

図1　紙の拘束乾燥モデル　カンバステンションと真空吸引で紙を拘束乾燥するドライヤの概念を示す．
Paper drying model under restraint

蒸気ドラム上では，

$$\frac{\partial \Delta\sigma}{\partial X}+\Delta f-\Delta g=0 \qquad (1)$$

$\Delta\sigma=D(\Delta\varepsilon)$：応力増分

ここで，f，g，Dはそれぞれ収縮力，摩擦力，弾性係数である．

また，フリーラン上では乾燥による収縮ひずみを考慮し，次のように考える．

$$\Delta\sigma=D(\Delta\varepsilon-\Delta\bar{\varepsilon}) \qquad (2)$$

$\Delta\bar{\varepsilon}$：乾燥による収縮ひずみ増分

図2は，フリーラン部での紙の*CD*応力の分布を計算したものである．紙端部では中央部に比べ*CD*の引張応力がゼロ近傍まで下がるため，紙は端部ほど容易に収縮することになる．収縮の大小と伸びの力学的特性は，一般に比例関係にあり，収縮こう配の大きい抄紙機端部の紙は，印刷時の湿し水により幅方向に不均一に伸びるため，各色の絵柄の位置がずれてファンアウトと呼ばれ

*1 広島研究所紙・印刷機械研究推進室長
*2 広島研究所レオロジー研究室長
*3 広島研究所紙・印刷機械研究推進室
*4 広島研究所機械プラント研究推進室
*5 製紙・紙工機械技術部製紙機械設計課

表1　タワープレス新聞輪転機でのファンアウト測定結果
Measurement results of fan-out using tower type printing press for news paper

供試新聞用紙の物性値			ファンアウト測定結果		ファンアウト評価法
			条　件	ファンアウト量	
新聞用紙（抄紙機の中央部の紙）	破断伸び	5.2％	新聞輪転機：タワープレス 運転速度：6万部/時 印刷：墨，黄，紅，藍(あい)の4色カラー	操作側：30 μm 駆動側：0 μm	新聞見開き2ページ ビデオ測定器付き顕微鏡にてレジスタマークの色ずれを計測し，ファンアウト量を求める．
	可逆伸縮率	0.13％/水分％			
新聞用紙（抄紙機の端部の紙）	破断伸び	3.2％		操作側：220 μm 駆動側：0 μm	
	可逆伸縮率	0.2％/水分％			

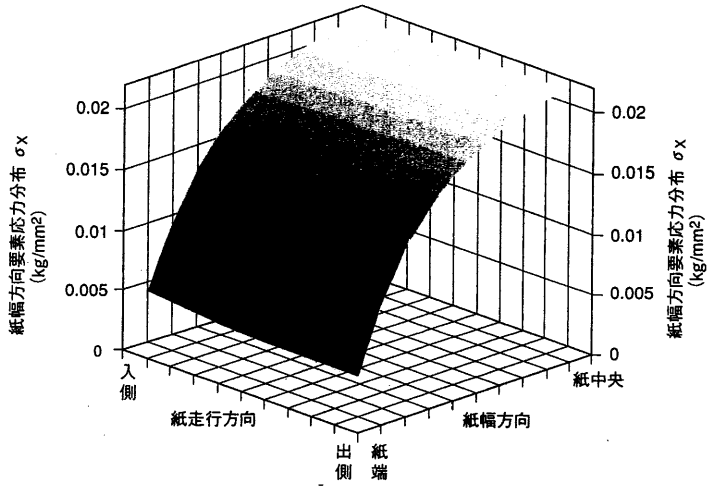

図2　フリーラン部要素応力分布　乾燥過程の紙の収縮力を考慮した *CD* 応力分布を示す．
CD stress distribution of paper in free run section

る印刷障害が起きる．**表1**はタワープレス型の新聞輪転機でフルカラー印刷した時のファンアウト量を示したもので，抄紙機端部から取った新聞用紙は中央部のそれに比べ，220μmと大きく，印刷時に絵柄が幅方向にずれる結果となる．

2．2　水分変化によるカール変形

一般に紙の乾燥過程では加熱面から蒸発面への水，蒸気の移動が起るため，紙の厚さ方法に水分分布が生じる．**図3**は多層紙の各層間に微細電極を埋込んでインピーダンス法で計測した紙層内の水分分布の変化とカールの傾向を示したものである．このような厚み方向の水分差は表裏の収縮差となって紙はカールする．

紙のカールは紙層構造による可逆性カールと乾燥履歴から生じる内部応力の表裏差からくる不逆性カールに大別される．紙層構造による可逆性カール k は二層構造モデル[2]として次のように表される．

$$k=\frac{24(\beta_2 H_2-\beta_1 H_1)}{t(E_1/E_2+E_2/E_1+14)} \qquad (3)$$

ここで，

β：湿潤したときの伸縮率　　H：水分変化
t：紙の厚み　　E：紙の弾性率
添字1，2：二層モデルの各層

一般の機械抄きの紙は表裏均一乾燥したとき，吸湿によって伸縮率の小さい側を内側にして *MD* を軸にカールする．また，一定の面圧で加熱面に湿紙を押当てて拘束乾燥したときは，吸湿によって内部応力が解放されると加熱面と反対面，すなわち最終的に乾燥される面を内側にしたカールが発生する．

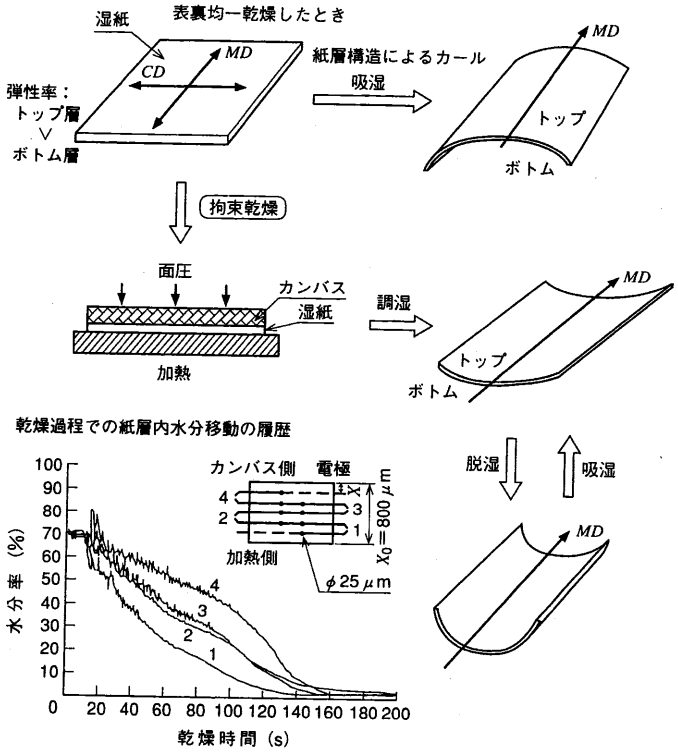

図3　紙層内水分移動とカール　乾燥過程の水分移動の履歴とカールの傾向を示す．
Moisture distribution of paper layer and curl tendency after drying

3．拘束乾燥方法とカール挙動

抄紙機ドライヤパートで発生するカールは表裏の水分移動が複雑なため，今まで定量評価された研究事例は見られない．ここでは拘束乾燥シミュレーションテスト装置を使用して拘束乾燥によるカールの挙動との関係を明らかにするとともに，紙層構造に起因するカールと乾燥による紙層内の熱物質移動に伴って発生する内部応力に起因するカールを分離することを試みた．

3．1　実験方法

実験にはパイロット抄紙機で抄いた湿紙を用いた．**表2**にその組成と乾燥条件を示す．実験方法は，湿紙を加熱ドラム上でカンバスにより約3 kPaの面圧を掛けながら加熱し，真空ドラム上では0.5 kPaの面圧相当の吸引を行い，加熱ドラムと真空ロール上を往復させながら乾燥した．乾燥条件は36本のドライヤに相当するよう36往復繰返した．乾燥のパターンについては，あらかじめ36往復したときの各1往復での水分率の変化を計測し，あるドライネスになったときに，表裏乾燥する面を反転した．また，最初

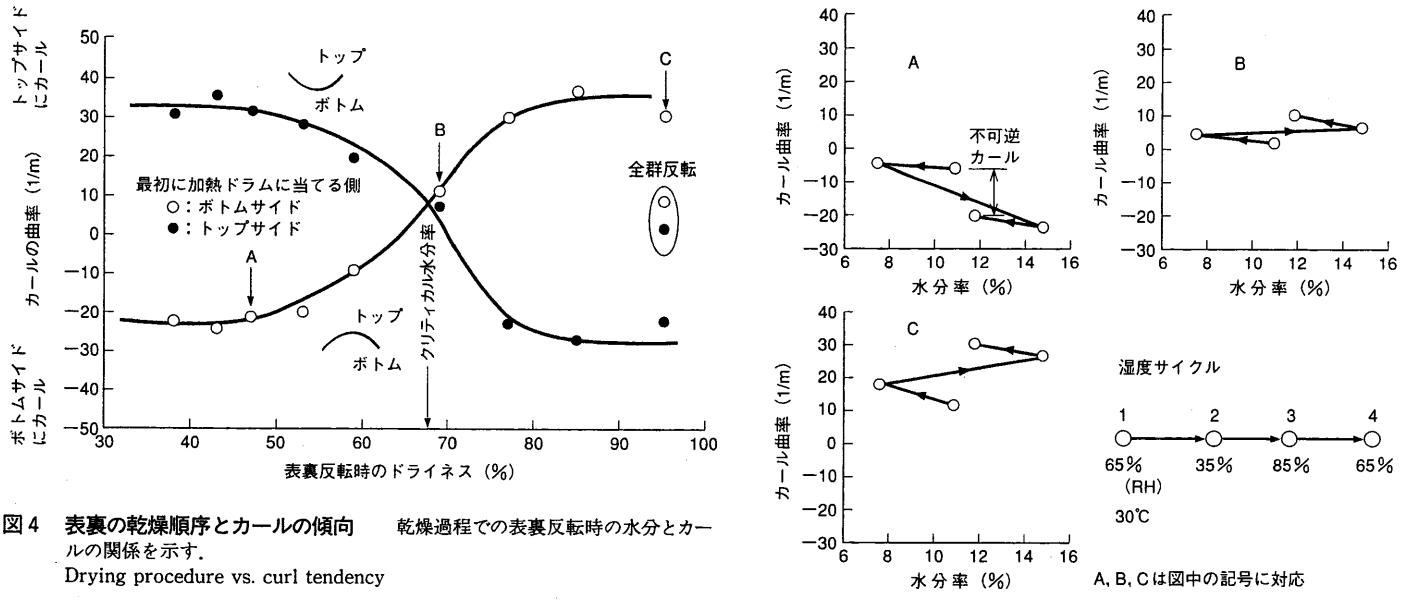

図4　表裏の乾燥順序とカールの傾向　乾燥過程での表裏反転時の水分とカールの関係を示す．
Drying procedure vs. curl tendency

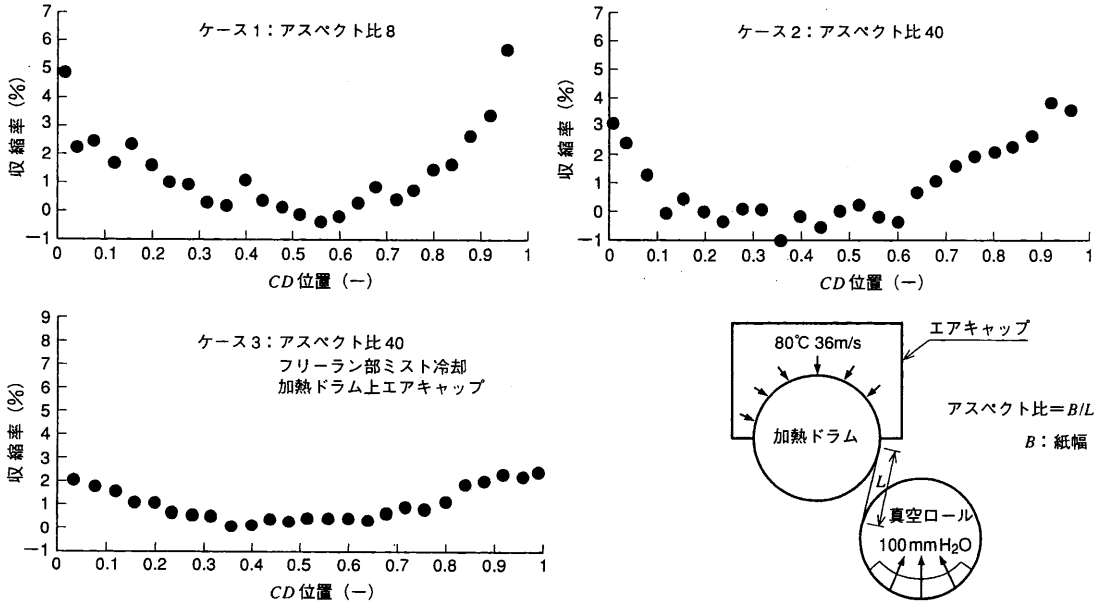

図5　拘束乾燥と幅方向収縮特性　フリーラン部のアスペクト比など乾燥条件を変えたときの幅方向収縮分布の測定結果を示す．
Drying restraint vs. *CD* shrinkage profile

表2　拘束乾燥実験条件
Experimental condition for paper drying under restraint

供試サンプル		拘束乾燥条件	
紙寸法	□ 250 mm	加熱ドラム温度 加熱時間	68℃ 1 s/回
紙種	新聞用紙	真空ロール 吸引時間	1 s/回
原料組成	CTMP*1　80 % SW クラフト*2　20 %	往復乾燥回数	36 回
坪量	48 g/m²	往復速度	35 m/min

＊1　CTMP：Chemical Thermo-Mechanical Pulp
＊2　SW：Soft Wood

に加熱ドラム面に当てる湿紙の表裏の順を変えて実験した．

3．2　実験結果

結果を図4に示す．カール値は乾燥後の紙を加湿脱湿を1サイクル繰返した後の30℃，湿度65％の値をプロットした．この結果，乾燥過程で紙を反転するときの紙層内水分を変えることで，カールの方向は反転し，表裏の順を変えることで，対称なカール変形特性が得られた．図中の交点（B近傍）は紙層構造によるカールで全群反転したときのカール値と一致する．このときの水分をクリティカル水分率と呼ぶと，クリティカル水分率になったときに表裏反転すると，図4中の右のカール測定図Bに示すように，乾燥による不可逆カールと紙層構造に起因する可逆カール共最小となり，表裏均一な乾燥が行われたことを示している．

4．乾燥による紙変形の防止

乾燥後の紙の変形を最小に抑えコントロールするためには，
(1) 紙層構造に起因するカールの特性を把握すること
(2) 乾燥過程で起る紙端部の寸法安定性を改善すること
(3) 紙の表裏の熱負荷をコントロールすること
が重要である．(1)については既に3章で述べたとおりである．

4．1　寸法安定性の改善

紙が吸湿脱湿したときの寸法変化やカールの発現，さらに弾性

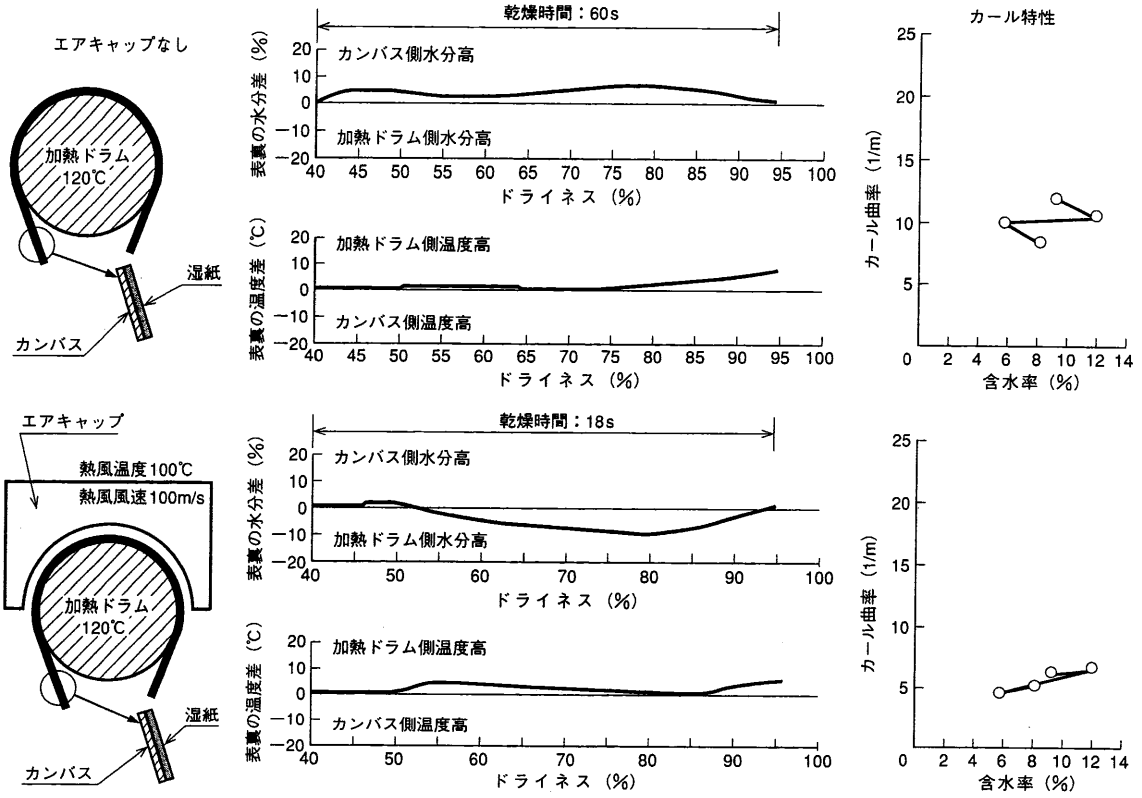

図6　エアキャップによるカールの挙動　加熱ドラム上の紙をカンバス越しに熱風噴射したときのカールの変化を示す.
Curl tendency using air impingement onto heating drum

率，破断伸びなどの力学的特性は乾燥過程での紙の拘束条件で決る収縮特性と密接に関係していることは2章で述べた．ここでは拘束乾燥シミュレーション実験装置を用いて，紙の幅方向の収縮特性を調べた．その結果を図5に示す．ここでアスペクト比とは紙幅 B とフリーラン長さ L との比 B/L で定義したもので，B/L が8と低い場合には紙端部の収縮率は6％と大きく，その幅方向の変化率も高い．一方，B/L を40と大きくすると，端部の収縮は4％前後まで下がることが分かる．また，さらに幅方向を均一化するためには，フリーラン端部の蒸発を抑制し，加熱ドラム上で乾燥促進することが有効である．図5中のケース3は，フリーランの紙端部でミスト冷却を行い，加熱ドラム上で熱風噴流乾燥を併用したときの収縮プロファイルを示したもので，紙端部の収縮率は2％前後に下がり，幅方向も均一化されることを示している．

4.2　カール防止

3章では，加熱ドラムに当る面を反転するときの水分率を変えることで不可逆カール，可逆カールが最小になることを示した．一方，加熱ドラム上での表裏の熱負荷を変えることでもカールは大きく変化する．図6は加熱ドラム上でカンバス越しに熱風噴流（以下エアキャップと呼ぶ）を当てたときの熱物質移動とカールの特性を表したものである．エアキャップを併用することでカール値は半減し，不可逆カールもほとんどなくなることが分かる．このように加熱ドラムからの熱負荷とカンバス側の熱負荷をコントロールすることでカールは防止できることが示唆された．

5．抄紙機ドライヤへの展開

最近の抄紙機[3]はますます高速化が進み，紙の高速走行安定性や断紙時のブローク処理を容易にしたいとのニーズから，トップフェルトセクションをできる限り長くした一段式拘束ドライヤ，あるいはオールトップフェルトのドライヤが求められている．しかしこれらのドライヤ実現のためには，紙の寸法変化を最小にし，紙幅方向の力学的特性を均一化する装置の配慮が必要である．

すなわち，

(1) フリーラン部のアスペクト比を上げる
(2) カンバス越しエアキャップの採用
(3) フリーラン部紙端部の乾燥抑制

などを考えていくことが重要であり，将来の抄紙機ドライヤのコンセプトは，これらの技術を採入れたものになっていくと思われる．

6．むすび

本研究では，紙層内の水の蒸発による紙の寸法変化や，乾燥過程での拘束条件，表裏の温度，水分アンバランスから生じる内部応力の解放により発現するカールの挙動を明らかにし，さらに吸脱湿で起こる紙の変形を最小にするための拘束乾燥技術にも言及した．これらの技術は，プリンタや複写機のカラー化によって求められる寸法安定性の良い紙を造る上で非常に重要な技術である．

本研究の成果は，当社の製品である抄紙機ドライヤの一流化のみならず，電子印刷機のようなオンデマンド印刷機の改良，開発にも貢献できるものと確信している．

参考文献

(1) 久野広明ほか，紙の乾燥メカニズムと寸法安定性，三菱重工技報　Vol.28　No.4（1991）p.340～345
(2) Jay, A. Shands, et al., Cross machine variation of paper curl on a twin-wire machine, Tappi Engineering Conference (1988)
(3) 鈴木節夫ほか，抄紙機ドライヤの高性能化，三菱重工技報　Vol.31　No.2　(1994)　p.79～82