

直接加熱セラミックヒートロール上の 温度分布に関する数値解析 (一次元モデルの場合)

加藤 泰生*・宮本 政英*

A Numerical Study on the Temperature Distributions of Direct-Surface-Heating Ceramic Fuse Roller

Yasuo KATOH and Masahide MIYAMOTO

Abstract

This report shows that the temperature distributions of the direct-surface-heating ceramic fuse roller are simply calculated by the one-dimensional heat conduction numerical analysis. Although the heated ribbon which was wound on to the fuse roller had already been used for an actual photo copier machine, there were still many remaining problems about the temperature distributions, heat capacity, material strength and the cost of the ceramic roller. The present report considers that the temperature distributions might be solved by the finite different method taking into account the size of the heat roller, the roller materials and the rotating roller velocity. We obtained the temperature distributions of the heating ceramic fuse roller, the feeding paper, and the gum roller used to press the paper, respectively. We examined numerically the effects of the surface coated non-metallic layer, after that we noticed that we had to pay attention to the effects of the non-metallic layer when we used it.

1. 緒 言

複写機用ヒートロールは、複写における転写工程のうち、紙に付着させたトナーを、熱と圧力によって紙に秘着させる定着装置の要の部品である¹⁾²⁾。通常のヒートロール定着機は、アルミ合金の筒の表面をフッ素樹脂などの耐熱性のコーティング膜で覆い、そのロール内部をハロゲンランプで加熱する機構になっており、また紙との接触を一様な圧力で保持するため反対側からシリコン製ゴムロールで加圧する構造となっている。

これに対して、直接加熱セラミックヒートロールは金属の母材にセラミック系の抵抗材や絶縁材などの非金属を積層した多層構造のロールで、表面での抵抗加熱方式となっている。これらは、表面抵抗ヒータ材は

かりでなく、温度の制御は特に重要であり、このことが精度の高い複写や消費電力の軽減に関連する。そして、表面温度にはあるきめられた範囲での設定温度がある。

本報では、直接加熱ヒートロールにおいて、表面非金属層(フッ素樹脂層、絶縁層、抵抗体層、結合材層)が、温度分布に及ぼす影響について、ヒートロール、紙及びゴムロールの温度場を連結させ、差分法を用いて理論解析を行った。今回は特に計算場を一次元熱伝導場に限定し、(ただし、基礎式は二次元場を想定)、その他の境界条件等は、任意に与える形として計算の簡素化を試みている。もちろん、今後、本モデルをより実際の機器に近い、二・三次元場のモデルへと発展させる予定である。

*機械工学科

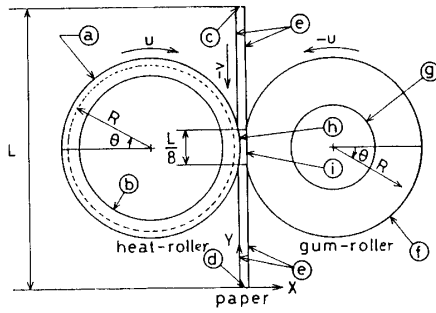


Fig. 1 Physical Model and Boundary Condition for Numerical Analysis

2. 基礎方程式および境界条件

Fig. 1に、本計算で用いた物理モデルとその座標系を示す。また図中のアルファベット記号に対する境界条件は、本文中のアルファベット記号に対応して与えられる。

基礎方程式は、一般の、運動・エネルギー方程式を基に、以下の仮定を用いて簡略化している。

- (1) 二次元モデルである。
- (2) 定着機および周囲気体の物性値は一定である。
- (3) 境界での熱の発生はない。また剪断力はない。
- (4) ロールと紙の接触は密であり、その間の温度ギャップはない。

2.1 基礎方程式

(i) 定着機に関するエネルギー式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{u}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + a \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_0}{\rho c} \quad (1)$$

ここに、 ρ , c , a はヒートロールの密度、比熱、温度伝導率をそれぞれ示し、また、生成項 $q_0/\rho c$ は、抵抗体の中に存在する項である。 u はロールの回転速度である。

(ii) ゴムロールの場合

前項の式で、 $\rho = \rho_g$, $c = c_g$, $a = a_g$ とおき、かつ生成項 $q_0/\rho c$ を省く。

(iii) コピー用紙断面

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial y} + a_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 v は紙の送り速度である。

2.2 境界条件

境界条件は、以下の様に、それぞれの場合に定められる。アルファベット記号は、図1に対応する。

Ⓐ $-\lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} = (h_h + h_{hn})(T - T_\infty)$

ここに、 $h_{hr} = \epsilon_n \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty)$ とおく。

Ⓑ $\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\text{inside of heat roller}} = 0$

Ⓒ $T = T_\infty$; 定着機にまだかからない側の紙の端面

Ⓓ $\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{end of paper}} = 0$

Ⓔ $-\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} = (h_p + h_{pr})(T - T_\infty)$

ここに $h_{hr} = \epsilon_p \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty)$ とおく。

Ⓕ $-\lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} = (h_g + h_{gr})(T - T_\infty)$

ここに、 $h_{gr} = \epsilon_g \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty)$

Ⓖ $\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\text{inside of gum roller}} = 0$

また、これら境界条件のうち、接触面 $L/8$ 区間では以下の接続条件が満足されているとする。

$$\lambda_h \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_h = \lambda_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p \quad (3)$$

$$\lambda_g \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_g = \lambda_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p \quad (4)$$

2.3 無次元化

以上の式を以下の無次元数を用いて無次元化を行う。

$$\hat{T} = \frac{T - T_\infty}{\frac{g_0 r_0^2}{\lambda}} \cdot \tau = \frac{u_0}{r_0} t, \quad R = \frac{r}{r_0}, \quad X = \frac{x}{r_0}$$

$$Y = \frac{y}{r_0}, \quad \hat{\delta} = \frac{\delta}{r_0}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad V = \frac{v}{u_0}, \quad P_e = \frac{u_0 r_0}{a}$$

$$B_i = \frac{h r_0}{\lambda}$$

(i) 基礎式

$$\frac{\partial \hat{T}}{\partial \tau} = -\frac{U}{R} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \theta} + \frac{1}{P_{eR}} \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right) + \frac{1}{P_{eR}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \hat{T}}{\partial \tau} = -V \frac{\partial \hat{T}}{\partial Y} + \frac{1}{P_{ep}} \left(\frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial X^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \hat{T}}{\partial \tau} = -\frac{U}{R} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \theta} + \frac{1}{P_{eg}} \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right) \quad (7)$$

(ii)境界条件

Ⓐ $-\frac{\partial \hat{T}}{\partial R} = (B_{ih} + B_{thr}) \hat{T}$

Ⓑ $\left. \frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right|_{\text{inside of heat roller}} = 0$

Ⓒ $\hat{T} = 0$, Ⓓ $\left. \frac{\partial \hat{T}}{\partial Y} \right|_{\text{end of paper}} = 0$

Ⓔ $-\frac{\partial \hat{T}}{\partial X} = (B_{ip} + B_{ipr}) \hat{T}$

Ⓕ $-\frac{\partial \hat{T}}{\partial R} = (B_{ig} + B_{igr}) \hat{T}$

Ⓖ $\left. \frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right|_{\text{inside of gum roller}} = 0$

$\left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right)_h = \frac{\lambda_p}{\lambda_h} \left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial X} \right)_p \quad (8)$

$\left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial R} \right)_g = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial X} \right)_p \quad (9)$

3. 数値解析方法および結果の考察

3.1 離散化

基礎式の離散化については, Patanker³⁾の成書に詳細に述べられているので, ここでは簡単にその概要を述べる. Fig. 2 がその概念であるが, この図は場の二次元格子配列の例である. 格子点はそれぞれコントロー

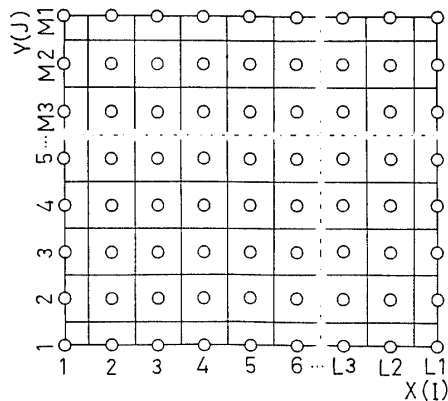


Fig. 2 Mesh Diagram for Temperature Field

ルボリュームの中央に位置している. 二次元温度場で, この点のエネルギー収支を考えると,

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a_s T_s + b \quad (10)$$

と置ける. ここに, a, b は離散化時の係数である. これは単純な式だが, 以下の計算の流れで解が得られる. ここに, 温度を圧力, 速度に置きかえても同様である.

1次元ステップ

格子点 i 番目の表示が次式で表わされるとする,

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (11)$$

ここで T_{i-1} の位置での値が次式で得られるものとする.

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1}$$

これら 2 式より, T_i, T_{i+1} について再整理すると,

$$T_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} T_{i+1} + \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (12)$$

従って, 式の比較より

Table 1 Physical Properties of Heat Roller

	λ W/m·K	c J/kg·K	ρ kg/m ³	h W/m ² ·K	α m ² /S	
heat -roll	テフロン層	0.36	1700	2170	9.76×10^{-8}	
	絶縁層	20.2	1040	3870	5.02×10^{-6}	
	抵抗体層	194.0	1040	3870	8.799	4.82×10^{-5}
	絶縁層	20.2	1040	3870		5.02×10^{-6}
	結合材層	20.2	1040	3870		5.02×10^{-6}
	母材金属	194.0	883	2787	8.799	7.88×10^{-5}
paper	0.06	1300	900	10	5.13×10^{-8}	
gum-roll	0.19	1500	970	8.799	1.31×10^{-7}	

紙の厚さ: 10^{-4} m

ヒートロールおよびゴムロール半径: 0.0205m

トナー定着温度: 170~215°C

ヒートロール肉厚 δ : 2×10^{-3} m

抵抗体層厚さ δ_s : 47×10^{-6} m

表面非金属層厚さ: 500 μ m

発熱量: 610W

回転数: 120rpm

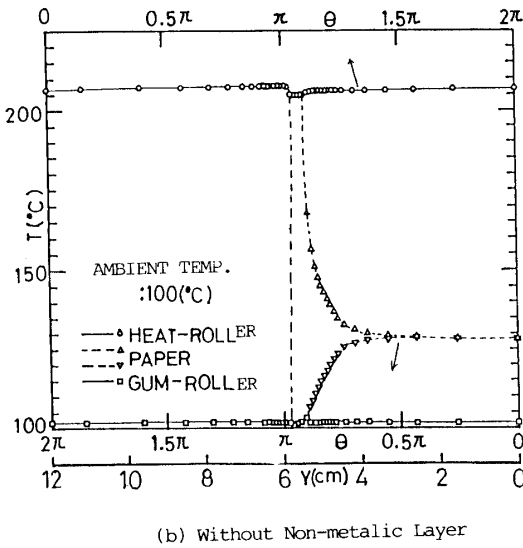
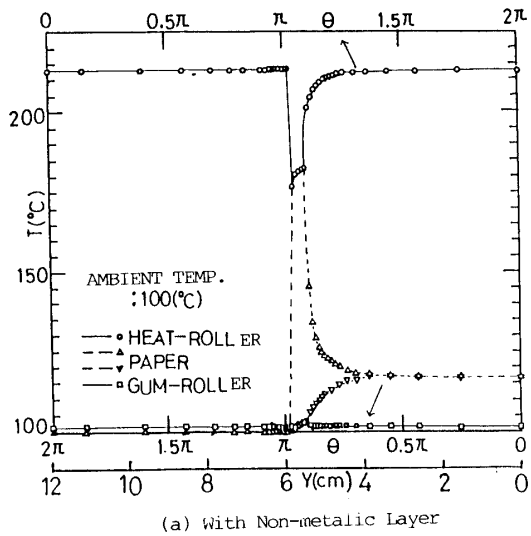


Fig. 3 Temperature Distributions

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (13)$$

初期状態を $i=1$ および $i=L-1$ とおくと

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1}, \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1}$$

$$P_{L-1} = 0, \quad Q_{L-1} = T_{L-1} \quad (14)$$

従って、これらを基に以下漸化計算を進めて行くことで、 T_i を得ることができる。本報では、回転体を取扱っているため、初期条件と最終条件を一致させる必要がある、この点注意を要する。

計算に用いた、定着機の諸元を Table 1 に示す。また、本計算アルゴリズムは、基本的に、SIMPLER に依り、計算は、山大計算センターの ACOS 850 を使っ

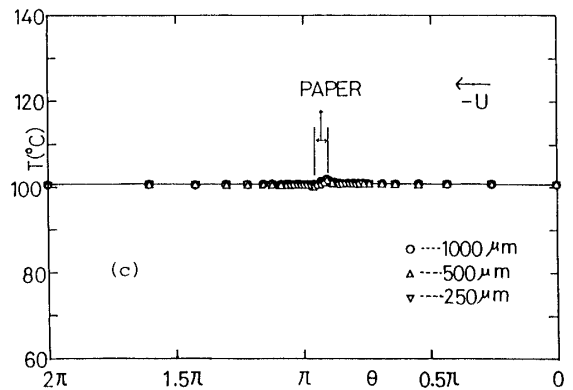
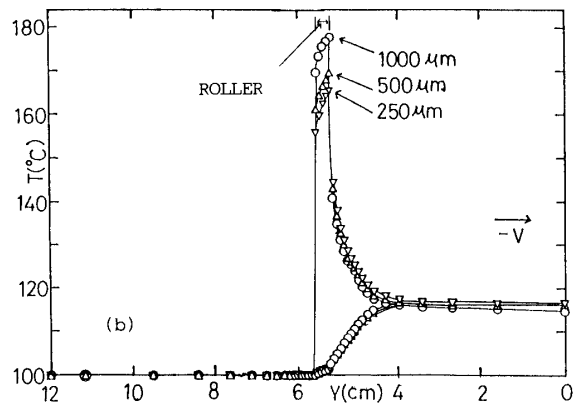
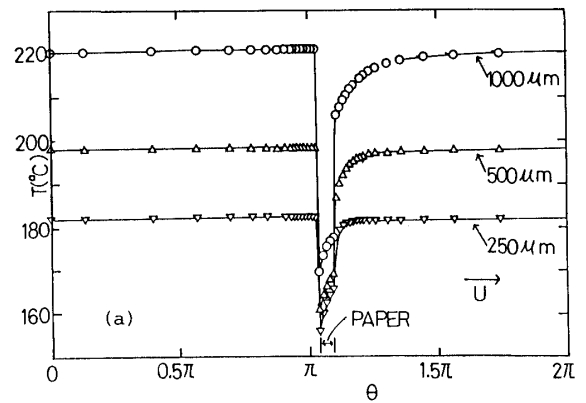


Fig. 4 Effect of Non-metallic Thickness on Temperature Distributions

て遂行した。

3.2 解析結果

Fig. 3 は、(a)非金属がある場合、(b)金属層のみの場合の温度分布である。周囲空気温度100°Cとにおいている。この図からわかるように、表面に非金属層のあるロールでは、紙の接触時の温度の低下が著しく、その回復にも幾分時間の経過を要している。紙の温度上昇は小

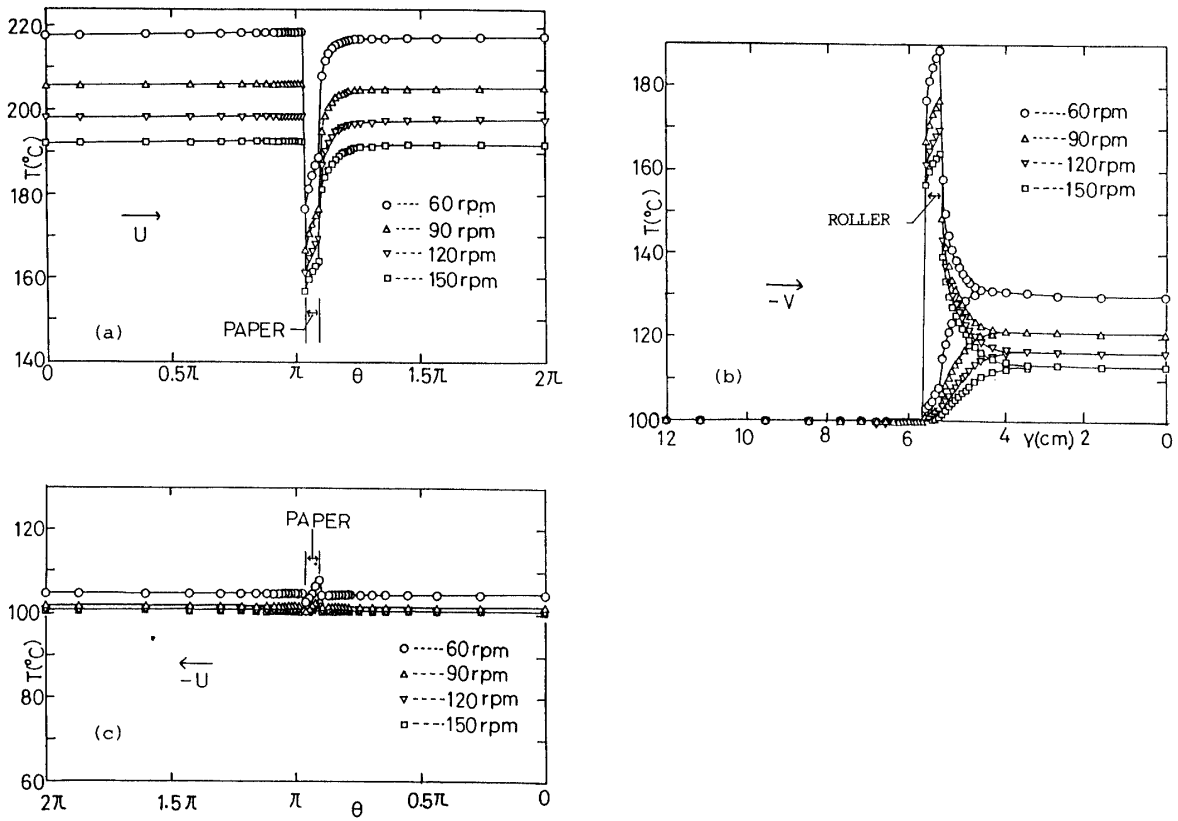


Fig. 5 Effect of Roller Velocity on Temperature Distributions

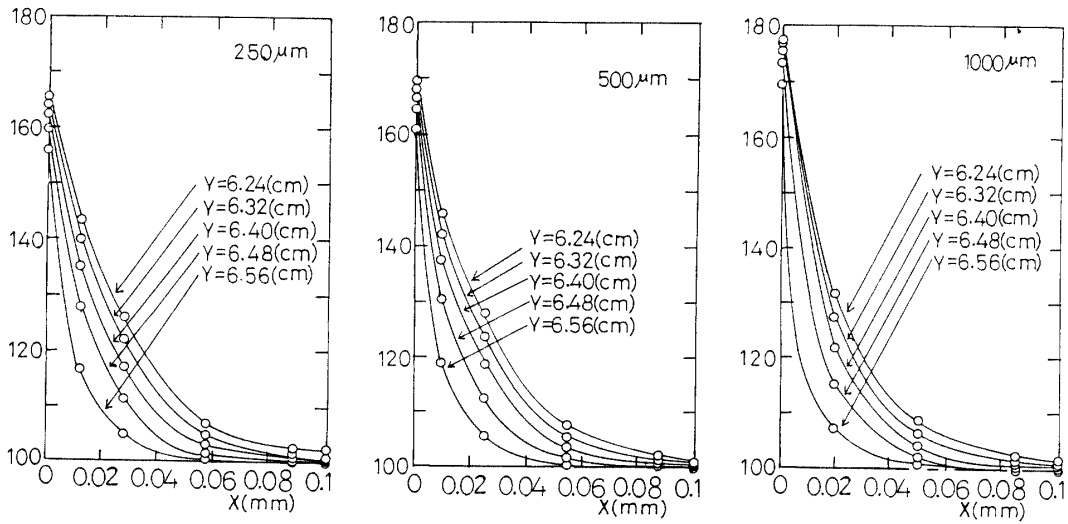


Fig. 6 Effect of Roller Non-metallic Thickness on Temperature Distributions of Feed Paper

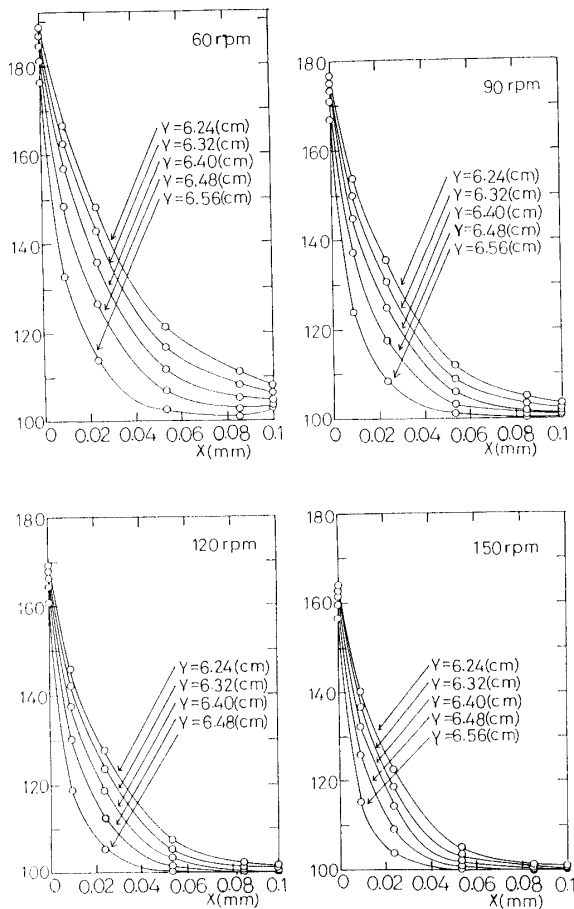


Fig. 7 Effect of Roller Velocity on Temperature Distributions of Feed Paper

さく、その分、出紙の際の温度は低い。この逆が(b)の場合で、紙の温度上昇が大きい程、出紙の際の紙面上温度は幾分(a)の場合より高い。非金属層による熱抵抗に起因していることは明らかである。

Fig. 4 は、この非金属層の厚さを変えることで得られた温度分布を示す。

非金属層の厚みに比例して、ヒートロール表面の温度は高くなっており、この分、紙の接触時の温度低下は著しく、かつ、温度の回復も極めて遅くなるのがわかる。しかしながら紙の温度上昇には、ロール表面温度程は著しくなく、その後の出紙の際の温度は、非金属層の厚みに依存しないほぼ等しい値をとる。

ゴムロール表面温度への影響は極めて小さい。

Fig. 5 は、ヒートロールの回転速度、すなわち紙との接触時間を変化させて得られた温度分布を示す。

この図から、回転速度の上昇とともに、紙の接触時間が当然短くなるため、紙の温度上昇は小さくなる。

又、回転速度が速くなるとヒートロール上の表面温度を下げることになり、かつ出紙の際の温度をも下げることになっている。接触時間が短くなると紙へのエネルギー輸送(伝導による)量が小さくなることが良く分かる。この間のヒートロール温度の回復時間は、回転速度が遅くなるほど長くなっている。

Fig. 6 は、ヒートロール表面非金属層の厚みが異なる場合の給紙の厚みの方向への温度分布の変化をみたものである。ここで紙において $X=0$ はヒートロールとの、 $X=1$ はゴムロールとの接触点を示す。接触時における温度コウ配は、非金属層が厚いほど小さく、このことは伝導による熱の移動は非金属層の厚みに依存し、薄いほど、この値が大きいことが分かる。

Fig. 7 は、ヒートロールの回転速度の違いによる給紙の厚み方向への温度分布の変化をみたものである。ヒートロールの回転が速いほど、その接触部での温度上昇は小さくかつ紙内部の温度上昇も小さい。回転速度が遅い60rpmの際、紙内部温度が、ゴムロール表面との接触部での温度より低く出ている。このことは一旦ゴムロールへ伝えられた熱により紙が加熱されたものと思われ、低速時で回転した際の特徴と思われる。

4. 結 論

直接加熱セラミックヒートロール上の温度分布に関する数値解析を行い以下の結論を得た。

- (1) 表面非金属層がある場合とない場合ではヒートロール表面温度の変化に大きな違いが出る。
- (2) 表面非金属層の厚みを増すことで、紙・ロールの温度を高くすることは可能である。
- (3) 給紙の厚み方向への温度分布から表面非金属層が厚いほど、熱伝導による温度上昇は幾分小さい。
- (4) ロールの回転速度が遅いほど、紙・ロールの接触時間が長く、紙の表面温度を高くできるがこの分能率が悪くなる。
- (5) 表面非金属層の厚みを増すと、表面温度が上昇するためにそのコントロールが問題となる。この使用においては十分な検討が必要である。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり多大の協力を頂きました当時学部学生の白神栄成・橋本 弦の両君に感謝致します。

使用記号

a, b, c, d ; 計算の際の係数

a ; 温度伝導率 [m²/s]

B_i ; ビオー数 [-]

h ; 熱伝達率 [w/m²K]

P_e ; ペクレ数

r ; 半径方向座標

r_0 ; ロール半径 [m]

t ; 時間 [s]

T ; 温度 [K]

T_∞ ; 周囲空気温度 [K]

u ; ロール回転方向速度 [m/s]

v ; 紙の給紙速度 [m/s]

x ; 座標軸

y ; 座標軸

[ギリシャ文字]

δ ; 非金属層の厚さ

ρ ; 密度

λ ; 熱伝導率

[添字]

g ; ゴムロール

h ; ヒートロール

p ; 紙

r ; 放射時の値を意味する。

参考文献

- 1) 柴田良一・飯村 勉, 電子写真用直接加熱セラミックヒートロール, 日立金属技報, Vol.3(1986) 31-35.
- 2) 山下恵太郎・野口浩司, 電子写真プリンタ用システム部品の開発, 日立金属技報, Vol.1(1985) 15-20.
- 3) Patanker, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill, NY (1980).

(平成3年4月15日受理)