

電子写真の定着過程における紙内の水分移動解析*

大原 俊一^{*1}, 羽山 祐子^{*1}, 谷川 洋文^{*2}, 鶴田 隆治^{*3}

An Analysis of Moisture Transportation within Paper in the Fusing Process of Electrophotography

Shunichi OOHARA^{*1}, Yuko HAYAMA, Hirofumi TANIGAWA and Takaharu TSURUTA^{*1} RICOH COMPANY, Ltd. R&D Center,
16-1 Shinei-cho, Tsuzuki-ku, Yokohama, 224-0035 Japan

Paper curl causes paper jam or print quality degradation in electrophotographic printers and copiers. It is useful to predict amount of the paper curl in electrophotographic process for the efficient products development. The fusing process which is a sub-process of electrophotography is one of the causes of the paper curl. But it had been unclear how the paper curl was generated in the fusing process. In a previous study, a paper curl mechanism based on temperature gradient in paper heating was revealed. The mechanism shows that a temperature gradient causes moisture transfer from the high-temperature side to the low-temperature side within paper and consequently the moisture content of the low-temperature side becomes higher than that of the high-temperature side. This causes a shrinkage difference between both sides of the paper and thus the paper curl is generated. In this report, a one dimensional numerical model to simulate moisture transfer within paper is proposed. In this model, paper is treated as a uniform porous material and the moisture diffusion and transfer are treated according to Darcy's law, as well as evaporation during heating. The computer simulations are carried out to determine the moisture distribution within the paper when the surfaces are heated at different temperatures. The results are finally verified by measuring electrical resistance of papers. They are found to be in good agreement.

Key Words : Printer, Fuser, Paper Curl, Moisture Content, Measurement, Modeling

1. 緒 言

カールは電子写真方式のプリンタや複写機の紙搬送問題の一つであり、印刷品質の低下や搬送経路でのひっかかり等の原因になる。そのため事前にカール量を精度良く予測することが効率の良い製品開発において重要である。カールの発生要因の一つは定着プロセスである。定着機で発生するカールは、紙を加熱し搬送する対となるローラの温度及び温度差に依存し、紙の種類、含水率によっても変化する複雑な現象であり、これまでも実験的な考察⁽¹⁾がなされているが、そのメカニズムは十分に解明されていなかった。先の検討で我々は、温度差により紙内で水分が高温側から低温側に移動することがカールの要因であることを明らかにした⁽²⁾。水分の移動は低温側の含水率を高め、それが表裏の収縮差の原因となりカールを発生させる。したがって、カールを予測するには、紙内の水分移動を解析的に求める必要がある。紙内の水分移動に関しては、製紙機の乾燥工程において紙の含水率の変化を求める取組みがなされている⁽³⁾。また、電子写真の定着機においても紙内の含水率分布を求める取組みがなされている⁽⁴⁾。しかしながら、温度差により発生するカールのメカニズムを説明できるような、厚さ方向の含水率分布及びその時間変化は求められていない。

そこで、本研究では紙を一様な多孔質構造体と仮定し、拡散とダルシー則による水分移動及び加熱による水分

* 原稿受付 2012年8月3日

^{*1} 正員, (株)リコー 研究開発本部 (〒224-0035 神奈川県横浜市都筑区新栄町 16-1)^{*2} 正員, 九州工業大学 大学院工学研究院 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)^{*3} 正員, フェロー, 九州工業大学 大学院工学研究院

E-mail: shunichi.oohara@nts.ricoh.co.jp



蒸発を考慮した一次元の水分移動解析を提案し、温度差がある加熱時の紙の厚さ方向の含水率分布を計算した。そして、薄紙の間に挟んだ電極間の抵抗値から含水率分布を実験的に求め、計算の妥当性を確認した。

2. 記号及び略号

MD : Machine Direction

CD : Cross Direction

PPC : Plain Paper Copier

S : 含水率

W_w : 吸湿した紙の重さ

W_d : 乾燥した紙の重さ

p_l : 温度 T における飽和蒸気圧 [Pa]

T : 温度 [°C]

ε : 空隙率

K : 透過率 [m^2]

K_{rl} : 水の相対透過率

D : 水分拡散係数 [m^2/s]

D_{eff} : 有効水分拡散係数 [m^2/s]

μ_l : 水の粘性係数 [Pa s]

c_{pl} : 水の定圧比熱 [J/(kgK)]

ρ_l : 水の密度 [kg/m^3]

λ_l : 水の熱伝導率 [W/(mK)]

c_{pg} : 空気の定圧比熱 [J/(kgK)]

ρ_g : 空気の密度 [kg/m^3]

λ_g : 空気の熱伝導率 [W/(mK)]

c_{pT} : 含水紙の定圧比熱 [J/(kgK)]

ρ_T : 含水紙の密度 [kg/m^3]

λ_T : 含水紙の熱伝導率 [W/(mK)]

c_{pp} : 乾燥紙の定圧比熱 [J/(kgK)]

ρ_p : 乾燥紙の密度 [kg/m^3]

λ_p : 乾燥紙の熱伝導率 [W/(mK)]

L : 気化潜熱 [J/kg]

V_0 : 印加電圧 [V]

V_l : 測定電圧 [V]

R_0 : 調整抵抗 [Ω]

R_l : 計測器の内部抵抗 [Ω]

R_p : 紙の抵抗 [Ω]

3. 水分移動解析

3・1 水分移動解析

加熱時の紙内の水分移動に関しては、Bandyopdhyay らが紙の厚さ方向と搬送方向の2次元の水分率分布を求めている⁽⁴⁾。この解析は紙の繊維間の空隙部を水蒸気が移動するとし、紙の吸着等温線から水蒸気濃度に応じた含水率を求めている。しかし、この解析ではニップ中の厚さ方向の水分の偏りが数%しかなく、カールの原因となるような10%を超える含水率の偏りが表されていない。また、前報⁽²⁾で示したように、加熱時間が長くなると紙から水分が蒸発して失われるが、この点も考慮されていない。定着過程では、数十msの短時間の加熱であるが、高温に曝される紙表面付近では水分の蒸発を考慮すべきである。

本報告の水分移動解析は、図1に示すように紙厚方向の一次元のモデルであり、紙は一様な多孔質構造体として扱っている。式(1)の連続の式、式(2)のエネルギー式を基本として水分は液層のみを考慮している。その流動は式(3)で表現し、相対透過率を用いたダルシー則(第一項)に毛管内の拡散の項(第二項)を加えている。第一項では飽和水蒸気圧の勾配が、第二項では含水率の勾配が水分流動の駆動力になる。式(2)の右辺第一項は熱伝導項、第二項は水分によるエンタルピー輸送である。第三項は水分の気化潜熱であり、この解析では100°C以上で水分が気化し潜熱を奪うと仮定している。また、その際に水分は蒸発して無くなると仮定している。

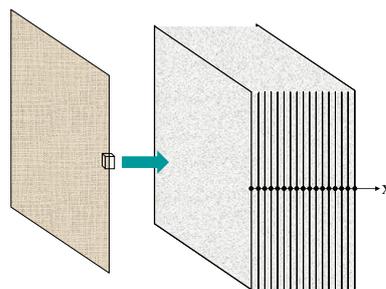


Fig. 1 Model of paper

$$\rho_i \varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial F_i}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_{pT} \rho_T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial (c_{pi} F_i T)}{\partial x} - L \cdot \rho_i \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2)$$

$$F_i = -\rho_i \left[\frac{K K_{rl}}{\mu_i} \left(\frac{\partial p_i}{\partial x} \right) \right] - \rho_i \left[D \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

解析に用いる紙の熱物性は含水率を考慮して求める。含水紙の定圧比熱は式 (4)、密度は式 (5)、熱伝導率は式 (6) で表される。それぞれ、乾燥紙 (紙の繊維)、水、空気の熱物性を、空隙率 ε と含水率 S に応じて配分し、含水率に応じた熱物性を計算する式である⁽⁵⁾。含水率は吸湿した紙の重さを W_w 、乾燥した紙の重さを W_d として式 (7) で定義する。

$$c_{pT} = (1 - \varepsilon) c_{pp} + \varepsilon \{ S \cdot c_{pl} + (1 - S) c_{pg} \} \quad (4)$$

$$\rho_T = (1 - \varepsilon) \rho_p + \varepsilon \{ S \cdot \rho_l + (1 - S) \rho_g \} \quad (5)$$

$$\lambda_T = (1 - \varepsilon) \lambda_p + \varepsilon \{ S \cdot \lambda_l + (1 - S) \lambda_g \} \quad (6)$$

$$S = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (7)$$

相対透過率 K_{rl} は含水率 S の関数として式 (8) で表し⁽⁵⁾、また水分拡散係数 D も含水率 S の関数として式 (9) で表す⁽⁶⁾。

$$K_{rl} = S^3 \quad (8)$$

$$D = D_{eff} S^3 \quad (9)$$

図2は温度差カールを再現するための実験装置の側面図である。平板のアルミプレートにゴムを貼り付けた加熱プレートを電動アクチュエータで移動させ、幅 20 mm の短冊状の試験用紙の表裏に押し当てる装置である。加熱プレートは内部に配置したシーズヒーターで加熱している。加熱面は幅 30 mm、長さ 100 mm であり、加熱温度は室温から 200°C 程度まで、荷重は最大 400N で、最小加熱時間は 0.05s である。実験時の荷重は 300N に設定した。試験用紙は、室温で一定湿度に保たれたデシケーター内で調湿を行った。試験用紙は各種厚さの PPC 用紙で、幅方向を MD 方向、長さ方向を CD 方向にしている。これは、温度差加熱のカールが MD 方向を軸に CD 方向に発生するためである。

図3の (a) はカール発生実験時、(b) は水分移動解析で用いた加熱状態の模式図である。

図3 (a) に示すように、実験で用いたカール解明装置の加熱プレートは、10 mm 厚のアルミ部に 2 mm 厚のゴム (シリコンゴム) を貼り付け、その表面で紙を加熱する。温度差カールの実験時は、ゴム表面の温度が高温側 160°C、低温側 80°C となるよう、アルミ部内のヒーターをコントロールする。この温度は、製品の定着機で起こりうる最大の温度差を想定している。加熱プレートは紙に対し 70 mm 離れた位置で待機し、動作スイッチを押すと移動して紙を加圧加熱する。

水分移動解析はコントロールボリューム法で行い、要素幅は計算の簡略化のため 1 μm で一定である。アルミ部の 10 mm を含めると計算量が增大するため、計算では図3 (b) のようにアルミ部を省き、ゴムの境界温度を高温側 160°C、低温側 80°C とした。別途、一次元非定常熱伝導計算で確認した結果、アルミ部との境界近傍のゴ

ム温度は 20 秒加熱でもほとんど変化しない (0.1 度程度) ため、ゴムの境界温度を一定値として与えても問題無いと判断した。解析でのゴムの初期温度はそれぞれ 160°C, 80°C, 紙の初期温度は 25°C とした。紙の厚さ方向位置を x_p とし、高温側の加熱プレートのゴムと紙の境界を 0 mm とした。

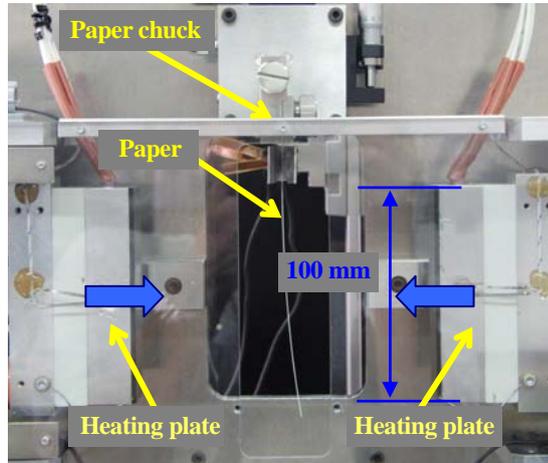
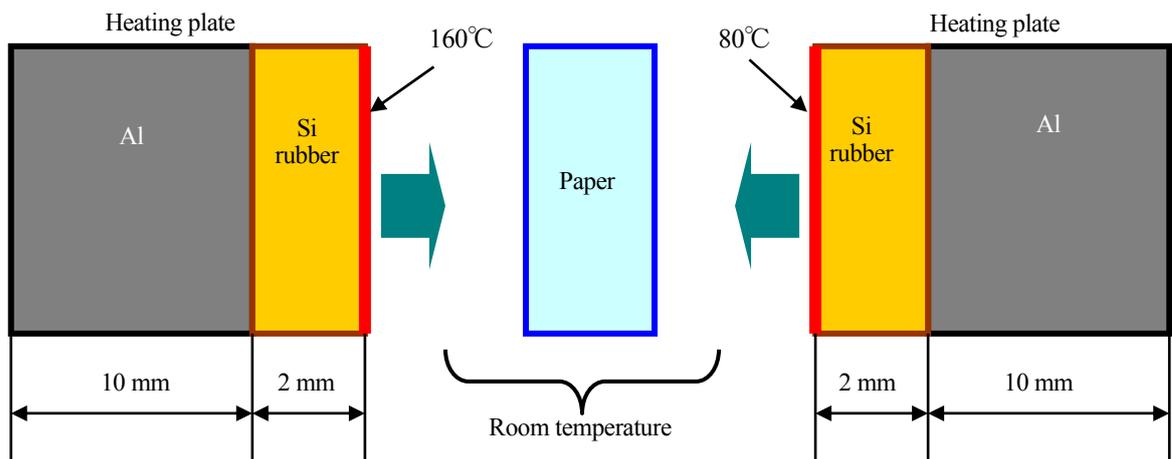
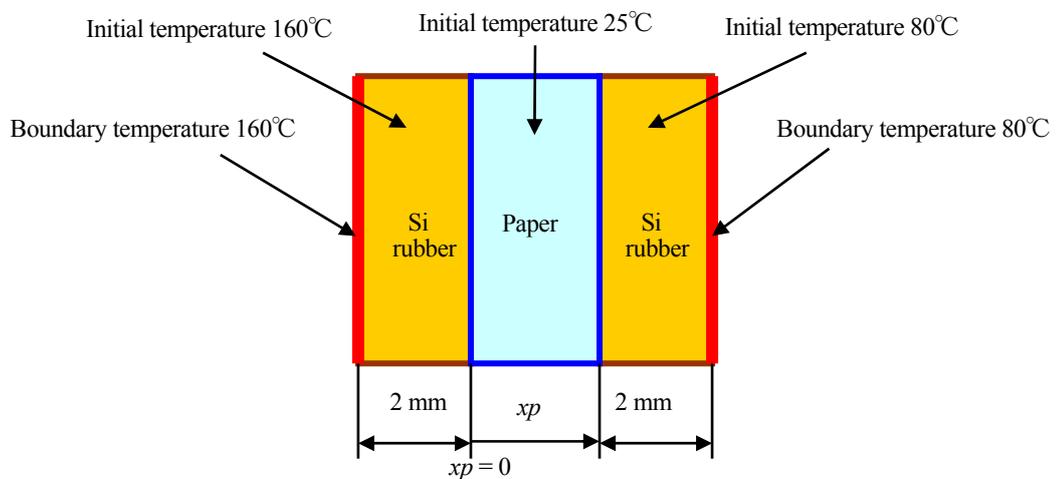


Fig. 2 Side view of the experimental apparatus to analyze the paper curl



(a) Experimental model



(b) Calculation model

Fig. 3 Heated paper model

表 1 は計算条件である。検証実験で用いる薄紙 3 枚分の厚さに相当する 0.27 mm で計算を行った。初期含水率はカール測定実験時の紙の含水率に合わせて 9.7%とした。初期温度は紙が 25°C、加熱プレートのゴムが、高温側 160°C、低温側 80°Cである。有効水分拡散係数 D_{eff} は文献 (7) の図から試算し、透過率は文献 (3) を参考に試算した。

Table 1 Parameters for the water transport analysis

Paper	Thickness	0.27 mm
	Specific heat at constant pressure: C_{pp}	1300 J/(kgK)
	Density: ρ_p	900 kg/m ³
	Thermal conductivity: λ_p	0.06 W/(mK)
	Porosity: ε	0.4
	Effective moisture diffusion coefficient: D_{eff}	1.0×10^{-6} m ² /s
	Permeability: K	1.0×10^{-14} m ²
	Discharge limit of moisture content: S_{IR}	0%
	Initial moisture content	9.7%
	Initial temperature	25°C
Water	Specific heat at constant pressure: C_{pl}	4180 J/(kgK)
	Density: ρ_l	989.43 kg/m ³
	Thermal conductivity: λ_l	0.6369 W/(mK)
	Viscosity coefficient: μ_l	5.77×10^{-4} Pa s
	Latent heat of vaporization: L	2257 kJ/kg
Air	Specific heat at constant pressure: C_{pg}	1008 J/(kgK)
	Density: ρ_g	1.10 kg/m ³
	Thermal conductivity: λ_g	0.0276 W/(mK)
	Viscosity coefficient: μ_g	1.97×10^{-5} Pa s
Heating plate (Rubber)	Thickness	2 mm
	Specific heat: C_p	1600 J/(kgK)
	Density: ρ	970 kg/m ³
	Thermal conductivity: λ	0.2 W/(mK)
	Initial temperature	High-temperature side: 160°C Low-temperature side: 80°C

図 4 は紙厚 0.27 mm の場合の、加熱後の時間と紙の各厚さ方向位置 x_p での含水率を示している。

x_p が 0 mm に近い高温側では加熱後含水率が一気に減少する。低温側に向かうに従い、含水率がピークになる加熱時間が長くなり、また、その値も大きくなる。この点から、水分が高温側から低温側に移動していることが分かる。最も低温側の $x_p = 0.27$ mm では 37%に達する。

この水分の駆動力は紙の内部の飽和水蒸気圧によって発生する。飽和水蒸気圧は温度により上昇するため、紙の厚さ方向に対し高温側の圧力は高く低温側は低くなる。そして、この圧力差により高温側から低温側に向かって水分が移動する。圧力差による水分の駆動力は式 (3) の右辺第一項に表されている。式 (3) の右辺第二項は毛管内の拡散の式で含水率差を減少させる作用があるが、相対的に圧力差による水分の駆動力が勝り、低温側の含水率を高い状態で保持する。

$x_p = 0.27$ mm を除き、最終的に含水率が 0%になるのは、要素の温度が 100°Cに達したため仮定により含水率を 0%としているためである。

初期含水率が 9.7%でも低温側ではそれ以上の値となることから、計算でも紙内の水分が高温側から低温側に移動していることが明らかになった。

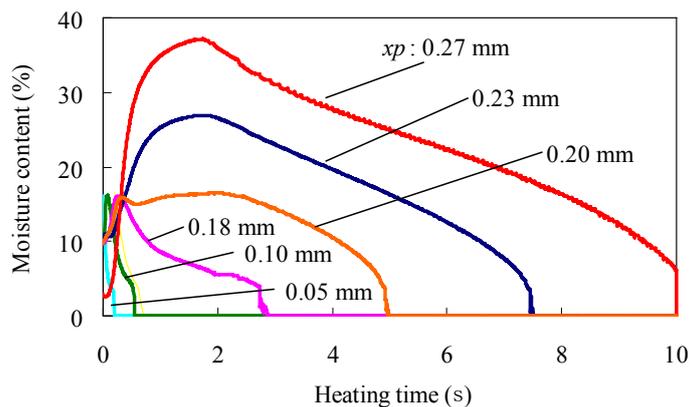


Fig. 4 Moisture content transition in paper (Calculation)

3・2 検証実験

3・2・1 校正曲線の作成

紙の内部の含水率は電極間の抵抗で求める手法が知られている⁽⁸⁾。この文献では交流を用いているが、本研究では電極部を構成する抵抗測定装置のインピーダンスが低く、交流では紙の抵抗変化が明確にならなかったため直流を用いた。

図5には抵抗測定装置を示す。(a)は外観図、(b)は配線図、(c)は等価回路である。図6は抵抗測定装置をカールの再現実験装置に配置した状態を示している。

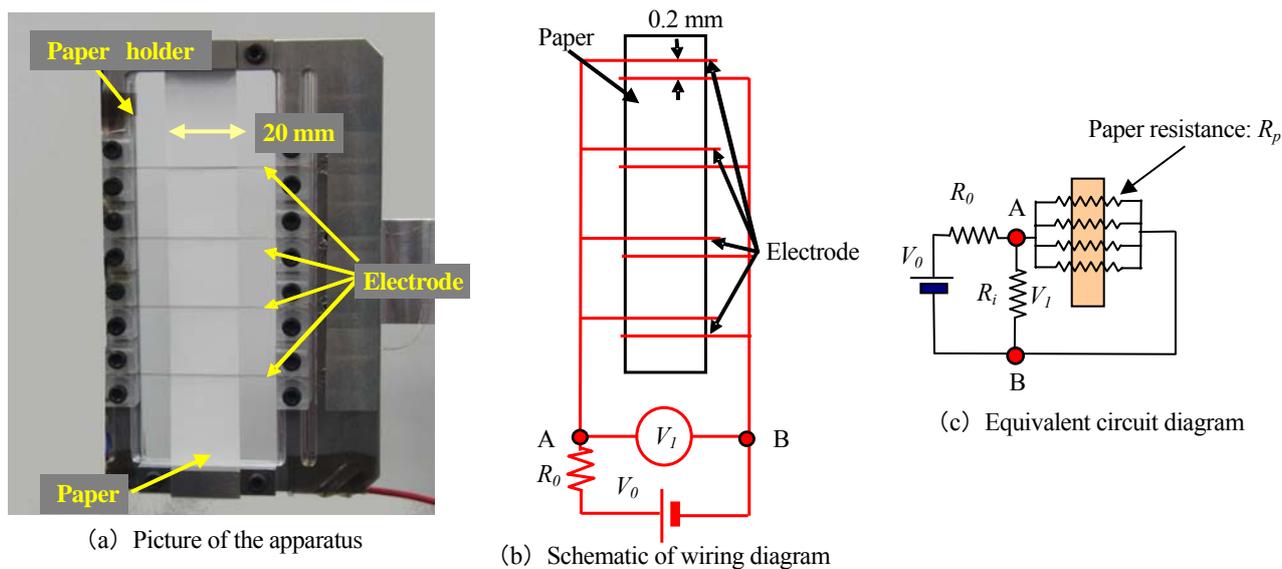


Fig. 5 Paper resistance measuring apparatus

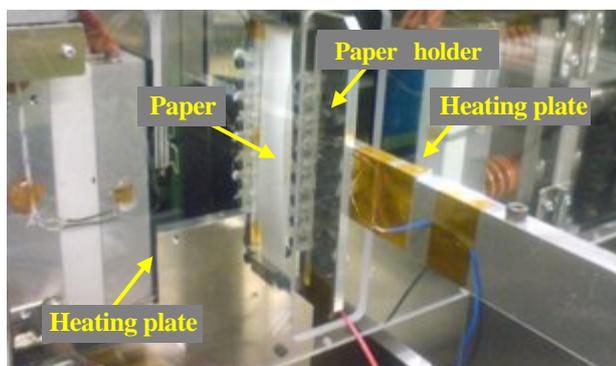


Fig. 6 Schematic of the paper resistance measuring apparatus and the experimental apparatus to analyze the paper curl

電極に用いる電線は直径 0.1 mm, 材質はタフピッチ銅である。電極間は 0.2 mm であり, 4 対を並列に接続して抵抗を下げるると共に測定位置の影響を低減している。印加電源 V_0 は 20 V の直流であり, 測定部の分圧を調整するための抵抗 R_0 は 9.9 M Ω である。電圧を測定したデータロガーの内部抵抗 R_i は 1 M Ω である。A, B 間の測定電圧を V_1 とすると, 紙に接する電極間の合成抵抗 R_p は式 (10) で表せる。

$$R_p = \frac{V_0 R_0 R_i}{V_1 (R_i - R_0) - V_0 R_0} \quad (10)$$

この装置を用い, 紙を加熱した際の抵抗から紙の厚さ方向の含水率分布を求める。

まず, 含水率の明らかな紙の抵抗を測定し, 抵抗と含水率の関係を求める。

抵抗測定は, 電極を挟むように 2 枚の試験用紙を抵抗測定装置に取り付けて行った。紙の厚さは 0.12 mm である。加熱温度は 50°C から 100°C まで 10 度毎である。紙の含水率は 5.8% から 30% まで用意した。5.8%, 9.5%, 15.2% の含水率の紙は相対湿度の異なる 3 つのデシケーター内に放置して作成し, 6.8% は実験室内放置で, 20% と 30% の場合は紙に直接水を塗布して作成した。含水率の測定は Moisture Analyzer Computrac Max-2000 を用い, 20% と 30% の場合は水の塗布前と塗布後の紙の重さから求めた。含水率 0% の紙は, 110°C の恒温層内に 1 時間放置して作成した。実験時の紙の初期温度は, 周囲温度相当でおよそ 25°C である。

図 7 はその結果の一例であり, 加熱温度 100°C の場合である。

紙の含水率が高いほど抵抗が低くなるのが分かる。含水率 5.8% と 6.8% は $1.0 \times 10^7 \Omega$ 前後であり, 含水率が増し 9.5% と 15.2% になると $1.0 \times 10^6 \Omega$ 程度になり, さらに 20% と 30% では $1.0 \times 10^5 \Omega$ 近くまで低下する。

一方, 抵抗は温度でも変化するため, 温度毎に校正線を作成した。その結果が図 8 である。抵抗値は変動が収まる加熱後 2 秒から 4 秒までの間で, サンプリングされたすべての値を平均して求めた。また, 100°C 以上では紙内の水分が急速に蒸発し抵抗値が安定しないため, 校正線は作成しなかった。図中, 加熱温度毎の曲線は目安として記載したもので, 実際の校正では各 2 点間を線形補完して抵抗から含水率を換算した。

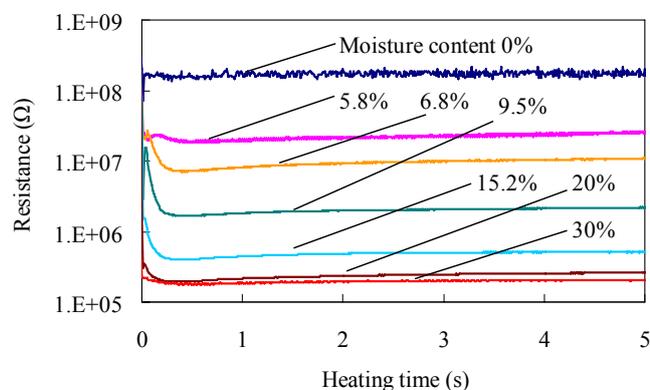


Fig. 7 Resistance transition of paper at some moisture contents (Heating temperature 100°C)

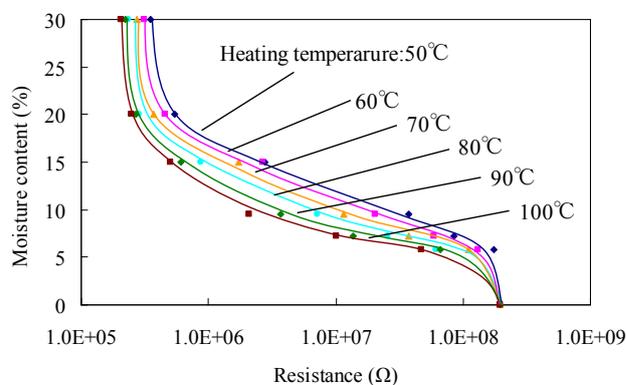


Fig. 8 Relationship between paper resistance and moisture content at some heating temperatures

3・2・2 温度差加熱時の抵抗変化

水分移動解析を検証するために, 温度差加熱時の紙内の含水率分布を求める。

まず初めに, 紙内の厚さ方向の抵抗分布を測定する。図 9 に示すように厚さ 0.09 mm の紙を 3 枚重ね, 厚紙を模擬する。そして, 加熱プレートと紙, 紙同士の間抵抗測定装置の電極を挟んで加熱し, それぞれの位置の抵抗から厚さ方向の抵抗分布を求める。高温側の加熱プレートと紙の間を Layer 1, 中央の紙と高温側の紙の間を Layer 2, 中央の紙と低温側の紙の間を Layer 3, 低温側の紙と加熱プレートの間を Layer 4 として, Layer 毎に測定する。紙は相対湿度 75% の環境で調湿し, 含水率は 9.7% である。一箇所の Layer を測定した後は紙を 3 枚とも交換し, 加熱前の紙の状態を一定に保つようにする。

図 10 が測定結果である。高温側の Layer 1 の抵抗が高く, Layer 2, Layer 3, Layer 4 と低温側に向かうに従い抵抗が低くなるのが分かる。また, すべての Layer で時間と共に抵抗値が増加している。

3・2・3 含水率の換算

図 10 の結果から図 8 の校正曲線を用いて含水率を求めるが、その際にいくつかの補正を行う必要がある。以下、各補正の目的と方法について述べる。

(1) 電極接触面積を考慮した抵抗値の補正

加熱加圧時、重ねた紙の各層の間の電極は、図 11 のようになると考えられる。(a)は Layer 1 と Layer 4 の場合で加熱プレートと紙の間に電極がある。紙に接する電極の外周を電氣的な接触範囲と考えると、(a)の場合は一方がゴムとなるため、その接触面積は(b)の場合の 1/2 となり、電極間の紙の抵抗が等しかったとしても測定される抵抗は(b)の 2 倍になる。校正曲線を求める実験では、電極は紙の間にあるため(b)相当であり、それに対し(a)の抵抗は 2 倍になる。よって、Layer 1 と Layer 4 の場合は、測定された抵抗値を 1/2 にして含水率の算出を行う。

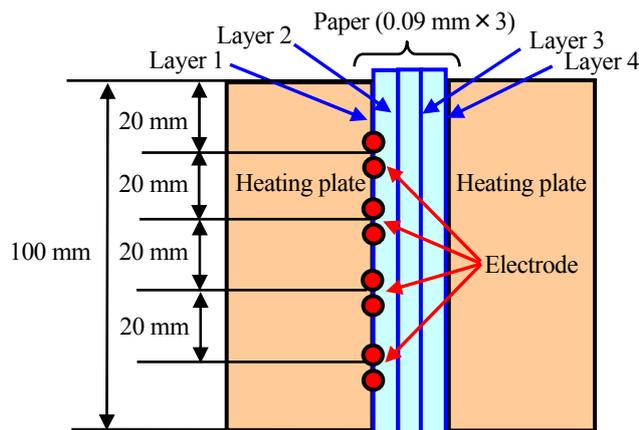


Fig. 9 Schematic of paper resistance measuring layers

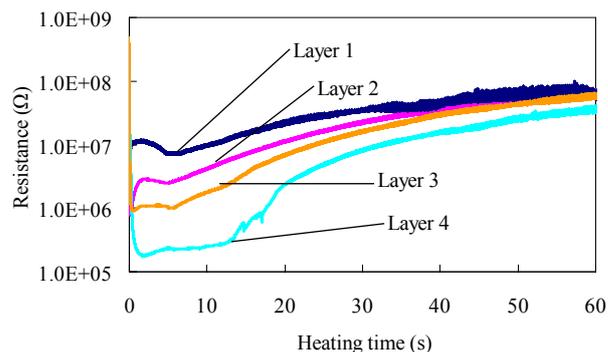


Fig. 10 Paper resistance transition at layers

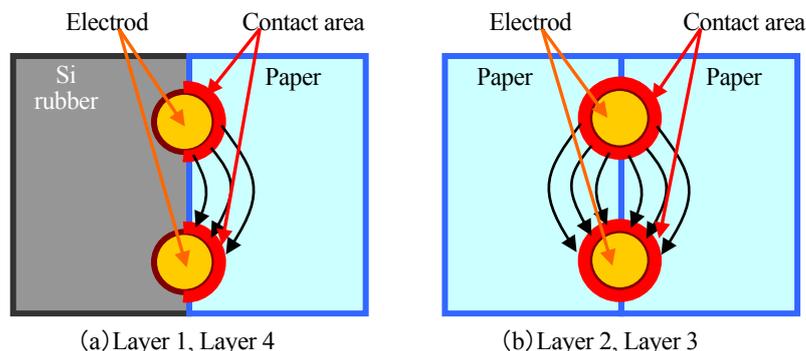


Fig. 11 Electric flow model between electrodes

(2) 電流の回り込みを考慮した抵抗値の補正

温度差加熱の場合、紙の厚さ方向の含水率は前述の計算や先の検討⁽²⁾により、高温側が 0~数%、低温側が 20~30%程度になる。図 7 から概算して、抵抗値は厚さ方向に $2.0 \times 10^8 \Omega$ から $1.0 \times 10^5 \Omega$ の分布を持つことになる。電流は抵抗が低い部位を流れるため、通常は電極間の最短距離の Layer を流れる。しかし、低温側の抵抗が高温側に比べ数桁低くなるため、高温側に電極があっても低温側に電流が回り込み、測定対象の Layer の抵抗を反映しない。そこで、等価回路を用いて電流の回りこみを考慮し、概算ではあるが各層の抵抗値の補正係数を求める。

図 12 はその等価回路を示す。Layer 1 の電極間抵抗を R_0 として、それぞれの Layer の電極間の抵抗と紙厚方向の抵抗を 10 個設定する。表 2 は仮定した抵抗値である。Layer 1 の電極間の抵抗 R_0 を $2.0 \times 10^8 \Omega$ と仮定し、Layer 2, Layer 3, Layer 4 の電極間抵抗 R_{21} , R_{22} , R_{23} をそれぞれ $1.0 \times 10^7 \Omega$, $1.0 \times 10^6 \Omega$, $1.0 \times 10^5 \Omega$ と仮定した。紙の厚さ方向の抵抗 R_{11} , R_{12} , R_{13} , R_{31} , R_{32} , R_{33} も仮定した値である。これらの抵抗は、紙内の水分移動と蒸発、温度変化により刻一刻と変化していくが、簡略化のため一定値とした。

表 3 は Layer 毎の初期抵抗と回り込みを考慮した抵抗、および抵抗の補正值である。回り込みを考慮した抵抗値は Layer 順に、 $9.9 \times 10^6 \Omega$, $1.1 \times 10^7 \Omega$, $1.6 \times 10^5 \Omega$, $0.91 \times 10^5 \Omega$ になる。よって、測定された抵抗値はそれぞれ、Layer 1 と Layer 2 で 10 倍、Layer 3 では 6 倍、Layer 4 では 1 倍として含水率に換算する。

(3) 温度補正

図 8 の校正曲線から分かるように、紙の抵抗は温度に対しても変化する。そのため抵抗から含水率を求めるには、紙の温度分布を知る必要がある。

紙の厚さ方向の温度分布は、各 Layer に熱電対を挟んで実測した。熱電対は（株）アンベエスエムティ社の極細薄熱電対 KFST-10-100-050 を用いた。

各 Layer の温度に応じた校正線を用い、抵抗から含水率を求める。紙の温度が 100℃ 以上の場合は、すべて 100℃ の校正線を用いた。

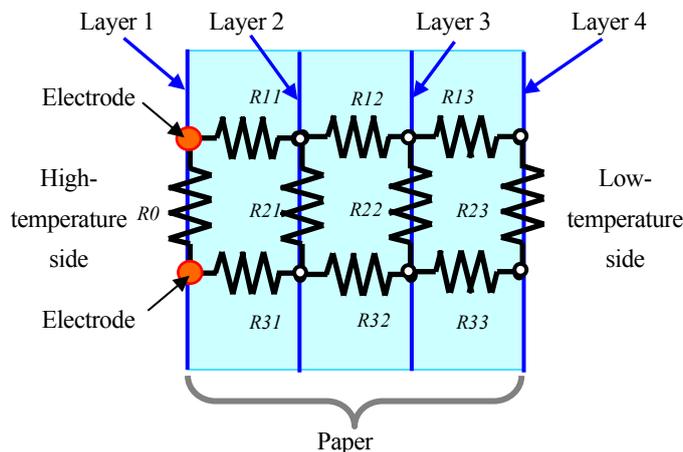


Fig. 12 Electrical model in paper

Table 2 Assumed resistance in paper

Resistance symbol	Initial resistance (Ω)
$R0$	1.0×10^8
$R11$	5.0×10^6
$R12$	5.0×10^5
$R13$	5.0×10^4
$R21$	1.0×10^7
$R22$	1.0×10^6
$R23$	1.0×10^5
$R31$	5.0×10^6
$R32$	5.0×10^5
$R33$	5.0×10^4

Table 3 Resistance compensation ratio of the layers

Layer No.	Initial resistance (Ω)	Resistance after compensation (Ω)	Compensation ratio
Layer 1	1.0×10^8	9.9×10^6	10
Layer 2	1.0×10^7	1.1×10^7	10
Layer 3	1.0×10^6	1.6×10^5	6
Layer 4	1.0×10^5	0.91×10^5	1

(4) 含水率測定結果

図 13 は抵抗値の補正前の加熱時間による各 Layer の含水率の測定結果であり、図 14 は抵抗値の補正後の結果である。いずれも電極接触面積の補正と温度補正は行っている。実験結果の曲線が不連続に変化しているのは、抵抗から含水率を算出する係数を段階的に切り替えているためである。

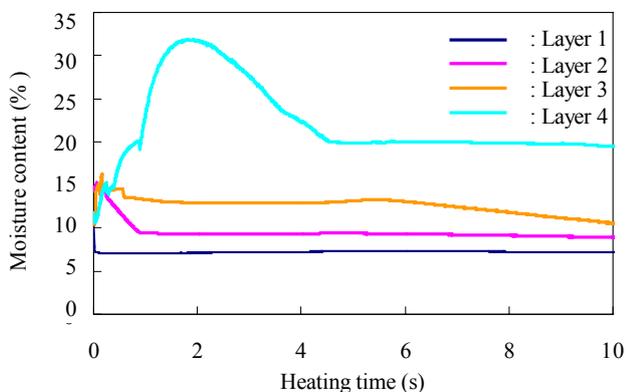


Fig. 13 Measured moisture content transition at each layers before resistance compensation

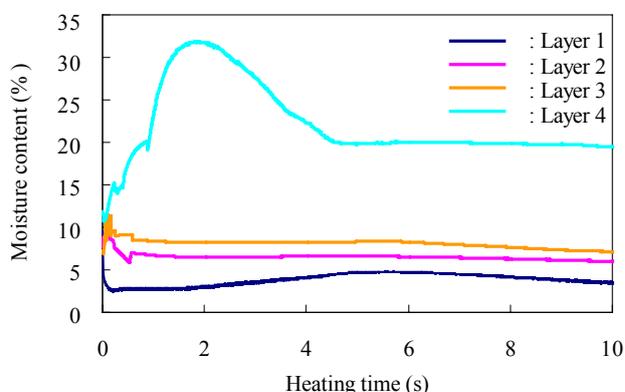


Fig. 14 Measured moisture content transition at each layers after resistance compensation

補正がない場合でも、低温側の Layer になるほど含水率が高く、そして Layer 1 では初期含水率を下回り Layer 4 では上回ることから、紙の厚さ方向に高温側から低温側に水分が移動しているとみなすことができる。補正を加えると高温側の抵抗が増すため含水率が低くなり、Layer 1 では補正なしの7%から3%になる。Layer 1 の温度は1sで130°Cに達するため、水の沸点を考慮すれば7%の含水率が有るとは考え難い。3%という値の妥当性は検証が必要であるが、少なくとも7%よりは現実に近い値と考えられる。

3・3 計算との比較

水分移動解析により求められた含水率分布を、紙の厚さ方向に対して電極が接する範囲で平均化する。

紙の厚さは0.09 mm であり電極の直径は0.1 mm であることから、図15の(a)から(d)に示すようにそれぞれの接触範囲は Layer 1 で0~0.05 mm, Layer 2 で0.04~0.14 mm, Layer 3 で0.13~0.23 mm, Layer 4 で0.22~0.27 mm になる。

図16は計算による含水率と、実験による含水率を共に示した図であり、太線が計算値で細線が実験値である。実験では高温側の Layer 1 から低温側へ向かって Layer 2, Layer 3, Layer 4 の順に含水率が高くなり、この傾向は計算でも表せている。さらに、それぞれの層での含水率の最大値はほぼ等しく水分移動解析による紙内の含水率分布計算は妥当と言える。

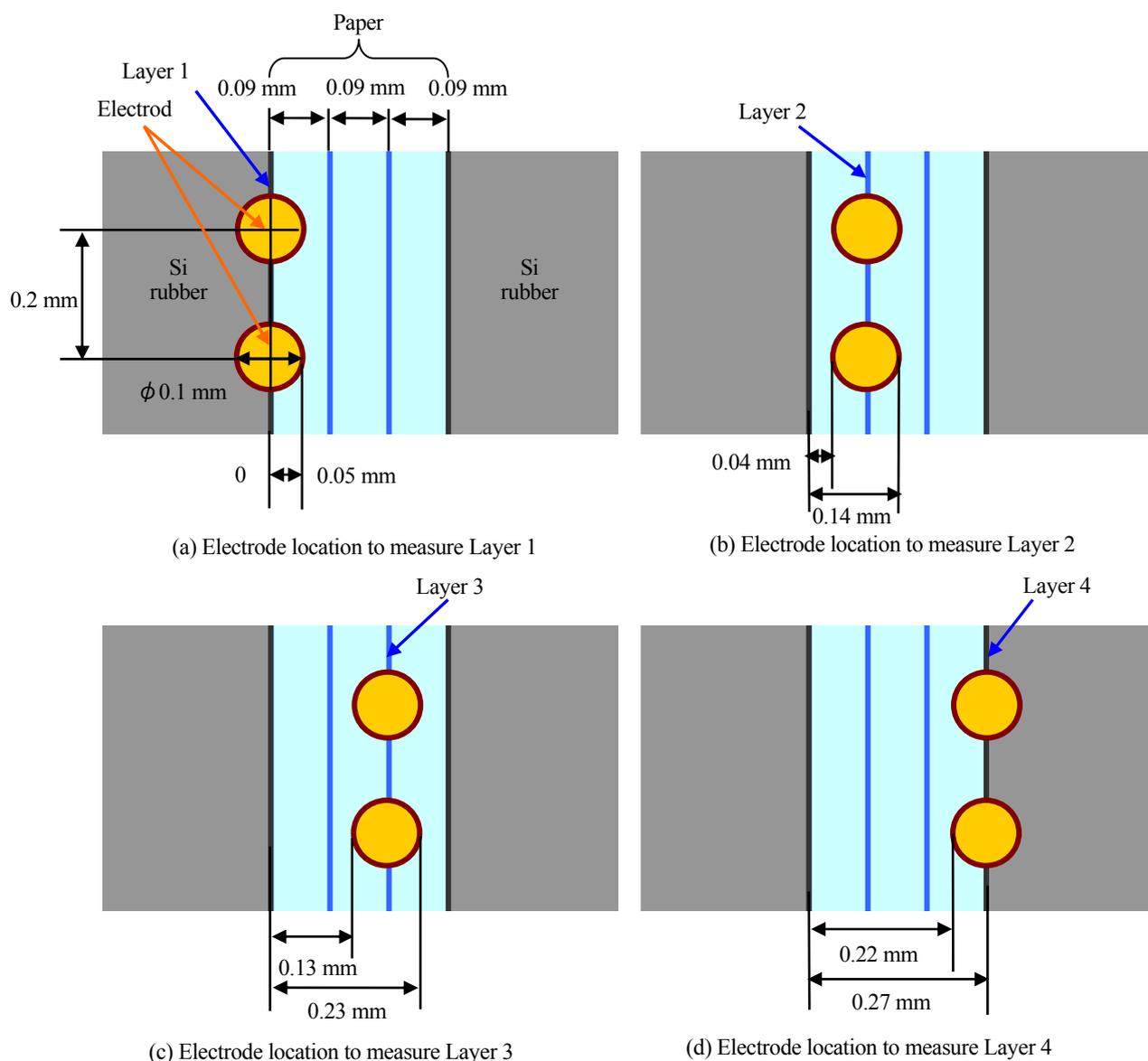


Fig. 15 Electrode location in paper

一方、計算では各 Layer とも最終的に含水率が 0% になるが、これは、限界排水分率 S_{IR} を 0 としているためであり、また、コントロールボリューム内の温度が 100°C に達した時点で含水率を 0% としているためである。実験では 10 秒後でも Layer 1 で 3% 程度残り、Layer 2 で 7%、Layer 3 で 8%、Layer 4 では 20% までしか含水率が低下しない。計算では要素の温度が 100°C になると、水分はすべて蒸発し含水率は 0% となると仮定している。しかし、実際には紙繊維の毛管の界面張力により 100°C を超えても紙内の水分が即座に蒸発しないため、含水率が 0% になるまでの時間が長くなっていると考えられる。加熱時間が長い場合の解析精度の向上のためには、蒸発の解析モデルの修正が必要である。

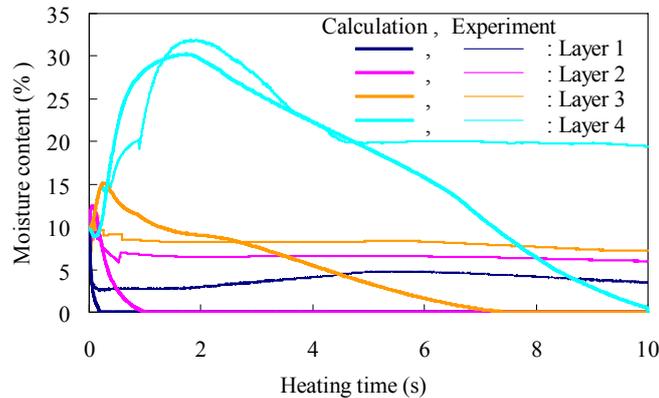


Fig. 16 Moisture content transition at each layers

4. 結 論

拡散とダルシー則による水分移動及び加熱による水分蒸発を考慮した一次元の水分移動解析を提案し、温度差がある加熱時の紙の厚さ方向の含水率分布を計算した。そして、実験により加熱時の紙の抵抗を測定して厚さ方向の含水率分布を求め、その妥当性を検証した。

- (1) 水分移動解析は、温度差加熱による紙内の水分移動とそれによる低温側の含水率の上昇を現せた。
- (2) 紙の抵抗測定により、温度差加熱による低温側の含水率の上昇と高温側の含水率の低下を明らかにした。また、低温側の含水率は 30% 程度まで上昇することが、計算と実験で明らかになった。
- (3) 計算と実験の比較では、紙の厚さ方向に応じた含水率の最大値がよく一致し、水分移動解析の妥当性を検証できた。

文 献

- (1) 野々村文就, 阿部祐二, 竹内伸夫, “複写機内の紙のヒートカール挙動に関する研究 (1)”, 紙パルプ技術協会誌, Vol. 52, No. 4 (1998), pp. 87-94.
- (2) 大原俊一, 羽山祐子, “電子写真の定着過程におけるカール解析”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 790 (2012), pp. 2121-2131.
- (3) 川水努, 金子毅, 鈴木節夫, 谷川洋文, 鶴田隆治, “紙の蒸気加熱過程における凝縮熱伝達特性に関する解析的研究”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 73, No. 727 (2007), pp. 175-182.
- (4) Bandyopadhyay, A. and Ramarao, B. V., "Transient Response of a Paper Sheet Subjected to a Traveling Thermal Pulse: Evolution of Temperature, Moisture and Pressure Fields", *Journal of Imaging Science and Technology* Vol. 45, No. 6 (2001), pp.1-14.
- (5) 河村洋, 土方邦夫, “熱と流れのシミュレーション”, 丸善株式会社(1995).
- (6) Chen, P. and Pei, D., "A Mathematical Model of Drying Processes", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 32, No. 2 (1989), pp. 297-310.
- (7) Karlsson, M., "Papermaking, Pt. 2: Drying", Fapet Oy (2000), pp. 74.
- (8) 星要之助, 久野広明, 橋本律夫, 岩渕牧男, 柳謙一, 吉田駿, “紙の乾燥過程における温度分布と水分率分布の同時測定”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 63, No. 607 (1997), pp. 289-294.