ゴムローラの膨潤加速試験方法*

小林祐子^{*1}, 平岡尚文^{*2}, 小川秀樹^{*1}, 西村隆宣^{*3}

A Method to Estimate the Amount of Swelling in Rollers under Working Conditions

Yuko KOBAYASHI^{*1}, Naofumi HIRAOKA, Hideki OGAWA and Takanobu NISHIMURA

^{*1} Toshiba Corporation Corporate Research & Development Center
Komukai-Toshiba-cho 1, Saiwai-ku, Kawasaki, 212-8582 Japan

This paper describes a method of estimating the amount of swelling in rollers under working conditions, such as high load pressures, high rotation speeds, high temperatures, and slippage occurring between paired rollers. Three kinds of swelling test system were considered. “Rotation tests” refer to swelling tests inside the actual environment of the machine. A pair of rollers rotates under conditions of load pressure, high temperature and slippage (difference in rotation speed). “Static tests” are similar to the traditional swelling test where the roller is free from speed, slip and load. “Quasi-static tests” is similar to Static tests but load pressure can be applied. The Experiments were efficiently conducted with these three systems by using DOE (design of experiments). As a result, rotation speed, slippage and load pressure (within the usual range in ATM) had small effects, whereas, environmental temperature, total contact time, application quantity and application frequency had large effects on roller radius. Accelerated test method was examined and finally, the maximum amount of swelling in the roller under the actual conditions inside the machines can be predicted using the regression curve analyzed from 3 experimental points by the “static test”, and the method provides a swelling test that is completed within one day.

Key Words : Rubber Roller, Swelling Test, Grease, Temperature, Heat Conduction, Rotary Machinery, Precision Instrument

1. 緒 言

金融機器・OA 機器・自動化機器などでは搬送媒体（カード・紙幣・PPC 用紙・切符・定期など）を介してインクや人の手による油脂等が装置内部のゴムローラと反応し、ゴムローラが膨潤することは珍しくない。また、ゴムローラの膨潤によって機器の性能が著しく劣化する場合もある。

ゴムローラのカタログには一般的に耐油性に関する表記（○△×, 「耐油性に優れる」など）がなされているものの、油の種類によってゴムローラの耐油性は異なってくるのであまり信頼性がない。そこで、油脂等によるゴムローラ膨潤トラブルを未然に回避するためには、予め予想される油脂等とゴムローラとの組合せで浸せき試験を行う必要がある。JIS規格⁽¹⁾では「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—耐液性の求め方」にて試験方法を規定している。用途や目的等により浸せき時間・浸せき温度の選択肢は広く、浸せき用の試験容器等が必要である。製品開発の場においては、より簡便に様々な油脂等に対するゴムローラの耐油性を確認するために例えば、ゴムローラの半分を常温にて浸せきし、1・3・7・15 日後に重量や変形量の測定を行っていた。しかし、試験日数がかかる上、ゴムローラの実際の使用条件は高温下であり、負荷荷重や高速回転も加わる。

そこで、本報では実機条件を模擬した試験を含めた3種類の試験システムを用いて実験計画法に基づき、グリ

* 原稿受付 2010 年 7 月 27 日

^{*1} 正員, (株)東芝 (〒212-8582 神奈川県川崎市幸区東芝町1)

^{*2} 正員, ものつくり大学 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

^{*3} (株)東芝

E-mail: yuko.kobayashi@toshiba.co.jp

ース（油脂の一種）によるゴムローラの膨潤量を測定した。また、ゴムローラのグリース拡散現象を数式モデルで1次近似することにより膨潤量と要因の関係を導き、実験式を得た。さらに、実機条件でのゴムローラ膨潤量を短時間で正確・簡便に評価できる事を目指して、加速試験方法を検討したので報告する。

2. 記号

θ_0	: 初期濃度
θ	: 濃度
c	: 比熱 [J/(kg·K)]
ρ	: 密度 [kg/m ³]
λ	: 熱伝導率 [J/(m·s·K)]
δ	: ゴム表面からの深さ [m]
t	: 時間 [s]
T	: 絶対温度[K]
e	: ネイピア数
$\triangle R$	: 半径変化 [m]
$\triangle W$	: 重量変化 [kg]
$A, B, C, D, a, b, m, \alpha, \beta, \gamma$	: 定数

3. 膨潤試験

3・1 静置試験

従来の膨潤試験方法に準じた試験方法（以後、静置試験と呼ぶ）を図1に示す。ゴムローラ（直径36mm、幅8mm、肉厚4mm）の中央部（端部の影響を受けない箇所）にグリースを幅3mm全周にわたり数ミリ厚さに塗布する。この時、市販の付箋紙を用いてゴムローラの周方向にマスキングしておくでグリースを塗布しやすい。所定温度の恒温槽にいれ、一定時間後に取り出し、グリースを取り除いてエタノールで拭き取った後、すぐにゴムローラの重量変化（電子天秤計、最小単位0.01 mg）および半径変化（工具顕微鏡、最小単位1μm）を測定し、グリース塗布・放置・洗浄・測定を繰り返す。図2に合計接触時間とゴムローラ半径の変化を示す。グリース塗布前のゴムローラは幅がやや凹形状であり半径方向に中央部分がやや低い。グリースとの合計接触時間が長くなるにつれて幅中央部が山形に盛り上がり、半径方向に増加（膨潤）する。（なお、以後、半径は幅中央の値とする。）予備試験の結果、合計接触時間以外には、塗布量（薄くグリースを塗布するか分厚く塗布するか）・塗布頻度（何時間ごとにグリースを塗り直すか）・周囲温度が半径方向増加に影響が大きいことがわかった。図3に室温25℃における塗布頻度(0.5時間毎, 6時間毎, 20.5時間毎)が半径に与える影響を示す。塗布頻度が短い方が立ち上がりは早い。ただし、合計接触時間が長くなるにつれ塗布頻度の影響は小さくなる。塗布頻度に関しては別途第5章で詳細に検討する。

Fig.1 Schematic of static swelling test

Fig. 2 Roller profile of swelling roller (25°C, Roller A)

Fig. 3 Effect of application frequency on swelling amount

3・2 回転試験

前節では静置試験を実施したが、機械内部におけるゴムローラの稼動条件を想定し、回転速度・速度差（すべり量）・負荷荷重を設定可能な実験装置を製作した。図4に概観、図5に概略構成図を示し、本実験装置にて回転試験を行う。上部ゴムローラ3つと下部金属ローラ3つは各々同軸であり、上部と下部を各々独立のモータを用いて回転速度や速度差を任意に設定できる。上部ゴムローラに対して、下部は溝付き（1mm）の金属ローラとなっており、金属ローラの中央部（3mm）にグリースを塗ってゴムローラに転写させると金属ローラの両溝に余分なグリースが除けられ、ゴムローラに薄く均一にグリースを塗布することが可能となると考えた。3つのローラ対は回転数同一となるが、独立に負荷荷重を設定でき、実験の効率化が図れる。なお、恒温槽内に入れることにより、周囲温度も変えられる。

Fig. 4 Schematic of rotational swelling test

Fig. 5 Schematic of rotational swelling test

前節3・1の結果で塗布量と塗布頻度の影響が大きいことから、これらの影響を小さくするためにグリースの供給は十分に行う必要があると考え、予めグリースを塗り直す頻度を調べた。その結果、周囲温度 60°Cでは30分ごと、80°Cでは10分ごとにグリースを重ね塗りする必要があることがわかった。そこで、回転試験ではこれらの

頻度でグリースを手動で塗り直し，L4 直交表に基づき，負荷荷重・回転数・速度差の 3 要因を 2 水準で変化させて膨潤試験を行った（表 1）．なお，ゴムローラ材料 2 要因（A はポリオレフィン系，B は天然系）と接触時間 2 要因（1.5hr, 3.0hr）は外側直交表に入れた，望大特性による実験結果を図 6 の要因効果図に表す．横軸は今回対象とした 3 要因の 2 水準を示す．縦軸は SN 比（対象とする要因の感度）を示し，各要因と各水準の SN 比は関連する実験番号の SN 比の平均で表される．なお，各実験番号の SN 比は，以下の式で求めた．ただし，添え字 i は実験番号，添え字 j は実験条件（外側直交表の 4 条件）， Δr は半径の変化量を示す．図 6 によれば，3 要因の中では回転成分（回転数・速度差）は，負荷荷重に比べると半径の変化量に与える影響が小さいことがわかった．したがって，敢えてゴムローラや金属ローラを回転させなくても良いことがわかった．

$$\text{SN ratio} = -10 \log(\sigma_i^2) \quad (1)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\left(\frac{1}{\Delta r_{i1}^2} + \frac{1}{\Delta r_{i2}^2} + \dots + \frac{1}{\Delta r_{ij}^2} + \dots + \frac{1}{\Delta r_{in}^2} \right)}{n} \quad (2)$$

Table 1 L4 orthogonal array of swelling amount in radius

Rotation Test L4(2 ³) 60°C				Rubber A, $\Delta R[\mu\text{m}]$		Rubber B, $\Delta R[\mu\text{m}]$	
No.	Load [N]	Rotation [Hz]	Slip [%]	1.5 [hr]	3.0 [hr]	1.5 [hr]	3.0 [hr]
R1	0.5	10	0	45.3	63.8	103.3	172.5
R2	0.5	0.4	10	47.3	60.3	95.0	166.3
R3	5	10	10	41.5	61.8	92.3	165.3
R4	5	0.4	0	41.0	60.3	83.5	167.5

Fig. 6 SN ratio by quasi-static swelling test.

3・3 改静置試験

前節の回転試験によれば負荷荷重に比べて回転成分（回転速度・速度差）の影響は小さく無視できる（図 6）．そこで次は，負荷荷重とその他の要因を同じ土俵で影響度を調べることにした．静置試験に負荷荷重のパラメータを追加した試験機（改静置試験と命名）を製作した．改静置試験機の概略構成図を図 7 に示す．グリース塗布面積は 3mm×3.6mm であり，回転試験時とほぼ同等の圧力になるように負荷荷重を設定した．表 2 に示す L8 直交表に基づき，負荷荷重・周囲温度・塗布量・塗布頻度の 4 要因を 2 水準で変化させて改静置試験を行った．その結果を図 8 の要因効果図に示す．図 8 によれば，4 要因の中では負荷荷重の影響は比較的小さい．したがって，

負荷荷重の影響も無視できるとすれば静置試験で十分になり、回転試験と比較すると容易に試験を実施可能となる。念のため、次節 3・4 では負荷荷重の影響を別途調べることにした。

Fig. 7 Schematic of quasi-static swelling test

Fig. 8 SN ratio by quasi-static swelling test

Table 2 L8 orthogonal array of swelling amount in radius

Quasi-Static Test L8(2 ⁴)					Rubber A, $\angle R[\mu m]$		Rubber B, $\angle R[\mu m]$	
No.	Load*	Temperature	Quantity	Frequency	1.5[hr]	3.0[hr]	1.5[hr]	3.0[hr]
Q1	5[N]	25[°C]	Small	Every 0.5hr	5	13	50	96
Q2	0	25	Small	Every 3.0hrs	13	23	34	37
Q3	5	60	Small	Every 3.0hrs	-17	-27	43	80
Q4	0	60	Small	Every 0.5hr	61	72	53	87
Q5	5	25	Large	Every 3.0hrs	13	20	84	132
Q6	0	25	Large	Every 0.5hr	24	36	101	153
Q7	5	60	Large	Every 0.5hr	17	33	151	201
Q8	0	60	Large	Every 3.0hrs	55	81	201	254

(*Equivalent Load)

3・4 試験方法のまとめ

ゴムローラの膨潤量を3種類の試験方法にて比較した結果、以下のことがわかった。

- (1) 従来の膨潤試験方法に準じた「静置試験」にて予備試験を行った結果、ゴムローラの膨潤量に大きく影響を与える要因は、合計接触時間・塗布量・塗布頻度・周囲温度であることがわかった。
- (2) 機器内で想定される環境条件を模擬した「回転試験」を行った結果、負荷荷重に比べて回転成分（回転速度・速度差）による影響は小さかった。
- (3) 静置試験の装置に負荷荷重を与えられるようにした「改静置試験」では周囲温度や塗布量や塗布頻度に比べて負荷荷重による影響は小さかった。

ここで、念のために回転試験による荷重依存性をさらに詳細に実験した。2種類のゴムローラ A, B で実験した結果を図9に示す。負荷荷重（横軸は幅で割った線荷重で表記）が大きくなると膨潤量がやや低下する傾向（8～9割）が見られた。ただし、機器で一般的に用いられるゴムローラは線荷重 500N/m 以下であり、この範囲までなら無負荷時と比較してほとんど差異がないと判断できる。したがって、

- (4) 機器内部の実使用環境下における膨潤量を実験的に調べる場合には、周囲温度・合計接触時間・塗布量・

塗布頻度が主要パラメータであり、静置試験による試験方法で十分であることが明らかになった。

次節では膨潤量の定式化を行う。この時、グリースの供給は十分と仮定する。すなわち、塗布量は十分に多く、塗布頻度も十分に多いとし、周囲温度・合計接触時間によるゴムローラ最大膨潤量を求める式を算出していく。

Fig. 9 Effect of load pressure on swelling amount

4. 定式化

4・1 膨潤量の定式化

ゴムローラにグリースが拡散していく現象を把握する為に数式モデルによる検討を行う。第2章の実験結果では膨潤量を半径の変化量で示したが、重量変化でも同様の結果が得られている。そこで、数式モデルによる定式化では現象を説明しやすい重量変化での検討を行う。グリースの拡散モデルを把握すべく、熱伝導問題⁽²⁾を応用（プロファイル法（積分法）：温度プロファイルの形を仮定し、物体全体のエネルギーの釣り合いから問題を解く近似的な方法）して定式化を行う。

Fig. 10 Density curve of grease

ゴム肉厚は無限とし、温度を濃度と置き換えて熱伝導問題を解く。図10のように一方へ無限に続く物体が最初一様な濃度0にあり、ある瞬間から表面を濃度 θ_0 に保つ場合を考える。ゴム内部での濃度は以下の式(3)で近似できるとすると、

$$\theta = \alpha x^2 + \beta x + \gamma \quad (3)$$

$$x = 0 \quad \text{で} \quad \theta = \theta_0 \quad (4)$$

$$x = \delta \quad \text{で} \quad \theta = 0 \quad (5)$$

$$\text{かつ} \quad \frac{d\theta}{dx} = 0 \quad (6)$$

α , β , γ は定数である. 式 (3), 式 (4), 式 (5), 式 (6) より

$$\theta = \theta_0 \left[\left(\frac{x}{\delta} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{\delta} \right) + 1 \right] \quad (7)$$

ここで, 「ゴム全体が単位時間に増える重量」は「グリース表面から単位時間に流出する重量」と等しく, グリース表面から単位時間に流出する重量は, 界面の濃度勾配に比例すると仮定すると, 式 (8) が成り立つ.

$$\frac{d}{dt} \left(c\rho \int_0^\delta \theta dx \right) = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (8)$$

ただし, 熱伝導の場合, c は比熱, ρ は密度, ($c\rho$ は熱容量) λ は熱伝導率であり, 今回はグリースの濃度拡散に用いる. 式 (8) に式 (7) を代入, 変数分離, 積分すると, 式 (9) が得られる.

$$\delta = \sqrt{\frac{12\lambda}{c\rho}} \cdot t^{1/2} = m \cdot t^{1/2} \quad (9)$$

なお, 定数部分を m と置いた. 式 (7), 式 (9) より,

$$\theta = \theta_0 \left[\left(\frac{x}{mt^{1/2}} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{mt^{1/2}} \right) + 1 \right] \quad (10)$$

ゴムの重量増分 ΔW は式 (10) を x が 0 から δ の範囲で積分すればよい. したがって,

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^\delta \theta dx = \theta_0 \left[\frac{x^3}{3m^2t} - \frac{x^2}{mt^{1/2}} + x \right]_0^\delta = \theta_0 \left[\frac{(mt^{1/2})^3}{3m^2t} - \frac{(mt^{1/2})^2}{mt^{1/2}} + (mt^{1/2}) \right] = \theta_0 \left(\frac{mt^{1/2}}{3} \right) \\ \Delta W(t) &= \frac{m \cdot \theta_0}{3} \cdot t^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

であらわせる. ただし, 絶対温度 T により m は変化, θ_0 は共通するので, 改めて定数 A , B および自然対数の底 (ネイピア数) e を用いて置き換えると,

$$\frac{m \cdot \theta_0}{3} = A \cdot e^{BT} \quad (12)$$

となる. したがって式 (11) は式 (12) を代入すると

$$\Delta W(t) = A \cdot e^{BT} \cdot t^{1/2} \quad (13)$$

となる。膨潤量は重量変化でも半径変化でも同様の結果が得られていることから式 (13) の左辺は半径変化 ΔR に置き換えてもよい。

$$\Delta R(t) = A \cdot e^{BT} \cdot t^{1/2} \quad (14)$$

なお、ゴムローラは無限に伸びるわけではないので、最終的にはゴム重量増分或いは半径増分は一定値に収束するものと考えられる。

4・2 実験式の検討

実験結果をもとに前節 4・1 で得られた式 (14) を検討する。式 (14) を対数表示すると、式 (15) に変形できる。

$$\ln(\Delta R) = \frac{1}{2} \ln(t) + (\ln(A) + BT) \quad (15)$$

式 (15) を検証するために、両軸を対数表示した実験結果を図 11 に示す。直線の傾きは式 (15) によれば 0.5 であり、回帰直線を求めると 25℃ は約 0.47、80℃ では約 0.51 とほぼ 0.5 であった。ただし、おそらく温度によって傾きが若干異なると考えられる。そこで、傾きを温度の依存性を考慮して $CT+D$ で表現し、式 (16) を得る。

$$\Delta R = A \cdot e^{BT} \cdot t^{CT+D} \quad (16)$$

したがって、図 11 に示すように 2 つの異なる温度の実験結果から式 (16) の定数 A , B , C , D を求めることができる。例えば、ゴムローラ材料 A (ポリオレフィン系) の場合の定数は以下ようになった。

$$A=0.161, \quad B=0.0158, \quad C=0.000736, \quad D=0.250 \quad (17)$$

なお、検証のために 60℃ (=333K)、30 時間後の半径変化の実験結果と式 (16)、式 (17) で得られる計算値を比較すると誤差 18% 程度、重量変化の場合には誤差 8% 程度であった。以上から式 (16)、式 (17) から得られる実験式は妥当性があると考えられる。

Fig. 11 Relation of contact time on swelling amount both in logarithmic expression (Rubber A)

Fig. 12 Effect of grease interval (Rubber B)

5. 加速試験方法

5・1 塗布頻度

膨潤初期においては塗布頻度の影響は大きく、接触時間が長くなってくると初期での塗布頻度の影響がほとんどなくなる（前節 3・1）が、改めて以下のケース S1 と S2 の検証試験を行った。

S1：はじめに 30 分ごとに 12 回塗布し直し、3 時間後と 6 時間後に膨潤量を測定する。その後、20 時間ごとに 5 回塗布し直し、毎回膨潤量を測定する（合計 106 時間、実験点 7 点）。

S2：はじめに 20 時間ごとに 5 回塗布し直し、毎回膨潤量を測定する。その後、30 分ごとに 12 回塗布し直し、3 時間後と 6 時間後に膨潤量を測定する（合計 106 時間、実験点 7 点）。

上記 S1 と S2 の試験を行った結果を図 12 に示す。最終状態（接触時間 106 時間）では半径変化は一致しているが、回帰分析すると、S1 と S2 では傾きの差が約 20% となった。S2 では初期におけるグリース供給が不十分だったと考えられる。

5・2 実験点数

前節 3・1 の検証試験 S1 の結果をもとに実験点数の削減を検討した。表 3 は S1 の実験点（基準は接触時間 106 時間・実験点数 7 点）を削減して行った場合に回帰直線の傾き・切片・各々の誤差がどう変化するか調べたものである。半径変化に対しては実験点が 2 点（接触時間 6 時間）でも傾き誤差は数%程度であった。なお、検証試験 S2 の場合は、接触時間が 106 時間でも傾き誤差は約 20% である。

したがって、S1 の実験点 2 点（接触時間 6 時間・30 分ごと塗布し直す）の場合には回帰分析の精度を保つことができることがわかった。

さらなる実験点数削減のため、塗布頻度をどの程度少なくできるか再度検証した。30 分毎・1 時間毎・2 時間毎にグリースを塗布し直し、2 時間後の膨潤量を比較した結果を表 4 に示す。その結果、半径変化に対しては 2 時間毎でも 30 分毎と同等の効果が得られることがわかった。

また、2 時間毎の実験点 3 点の回帰直線（接触時間と半径変化を対数で表示）を求めると、検証試験 S1（接触時間 106 時間・実験点数 7 点）とよく一致する（図 13）。

以上から、静置試験による膨潤試験は 2 時間ごとに 3 回（総接触時間 6 時間）グリース塗布・膨潤量測定を行うことにより、精度の良い回帰直線が得られることが検証できた。

Table 3 Effect of experimental points on formula (Rubber B, 25°C)

Time [hr]	Gradient	Intercept	Gradient Error	Intercept Error	Case, Experimental Points
106	0.475	4.75	0.0	0.0	S1, 7 points
46	0.471	4.76	-0.8	0.1	S1, 4 points
26	0.486	4.74	2.3	-0.4	S1, 3 points
6	0.456	4.78	-3.9	0.5	S1, 2 points
106	0.568	4.27	19.6	-10.1	S2, 7 points

Table 4 Effect of application frequency of grease (rubber B, 60°C, 2hrs)

Frequency [hr]	$\Delta R[\mu\text{m}]$
0.5	153
1.0	154
2.0	154

Fig. 13 Regression curve by experiment results (rubber B, 60°C)

5・3 加速試験方法

実機使用条件相当においてグリースによるゴムローラの半径方向の膨潤量がどの程度になるか、その加速試験方法と予測方法に関してまとめる。

膨潤試験は静置試験（図 1）により行う。ゴムローラの幅中央部約 3mm をマスキングし、全周にグリースを数ミリ厚に塗布し、マスキングをはがす。恒温槽を予想される環境温度に設定し、恒温槽内にゴムローラをつるしておく。2 時間毎に、膨潤量を計測してグリースを塗布し直す作業を 3 回繰り返す。

上記試験にて得られる実験結果（3 点）から接触時間（対数）と半径変化（対数）の無負荷時回帰直線を求める。この実験式（回帰直線）により任意の接触時間における最大膨潤量（半径変化 ΔR ）を求めることができる。なお、負荷荷重が実用範囲内（500N/m 以下）では負荷荷重の影響は無視できる。

また、2 つの異なる温度で実験すれば得られる 2 つの実験式から式（16）の定数 A, B, C, D を求めることができ、求まる式から任意の接触時間と任意の温度における最大膨潤量を推定することが可能となる。

6. 結 言

実機使用条件相当におけるゴムローラのグリースによる膨潤量を定量的に簡単・正確に予測する試験方法について検討を行ってきた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 回転数や速度差（＝滑り率）による影響はほとんど無視できる。
- (2) 負荷荷重の依存性に関しては負荷荷重があまり大きくない範囲（線荷重 500N/m 以下）ではほとんど影響がなく、負荷荷重が大きい場合は半径方向の膨潤量が抑制されて無負荷時の 8～9 割程度になる。
- (3) 実機条件の膨潤試験（＝回転試験）を静置試験にて代用できる。
- (4) 周囲温度・合計接触時間・塗布量・塗布頻度がゴムローラ膨潤量の主要パラメータであるが、グリース供給を十分に行えば周囲温度と合計接触時間が膨潤の主要パラメータである。

また、加速試験方法および膨潤量の予測方法を明らかにした。

- (5) 静置試験による膨潤試験は 2 時間ごとに 3 回（総接触時間 6 時間）グリース塗布・膨潤量測定を行うことにより、精度の良い回帰直線が得られる。
- (6) 回帰直線から任意の接触時間における膨潤量が計算できる。（なお、得られる値は実機使用条件にてグリースが十分に供給されていると仮定した場合におけるゴムローラの最大膨潤量の予測値である。）
- (7) 異なる 2 つの環境温度下での実験データがあれば、任意の接触時間と任意の温度における膨潤量を予測可能である。半径方向の変化 ΔR は環境温度 $T[K]$ 、接触時間 $t[hr]$ として、以下の関係がある。ただし、A, B, C, D は実験定数である。

$$\Delta R = A \cdot e^{BT} \cdot t^{CT+D}$$

以上から、特別な試験装置を製作したり、手間や時間をかけたりしなくても簡単に正確に膨潤量を予測できる。

謝 辞

終わりに本研究を始めるきっかけを与えて下さった（株）東芝 服部俊介氏、ならびに、まとめや考察においてご指導頂いた東京工業大学山浦弘教授の諸氏に謹んで感謝申し上げます。

文 献

- (1) “加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—耐液性の求め方”, JIS6258, 2003
  - (2) 甲藤好郎, “伝熱概論”, (株) 養賢堂 (1989) pp.38-40.
  - (3) Kobayashi, Y., Hiraoka N., Ogawa, H., Nishimura, T., A Method to Estimate the Amount of Swelling in Rollers under Working Conditions, *Proceedings of the 2003 IIP/ISPS Joint MIPE'03* No.03-208, pp.159-160
-