

静電式ロールクリーナーの綿糸吸着・脱離特性

古屋 佑樹*, 杉本 俊之*.¹

(2023年3月1日受付; 2023年3月20日受理)

Catch and Release of Cotton Threads by an Electrostatic Lint Roller

Yuki FURUYA* and Toshiyuki SUGIMOTO*.¹

(Received March 1, 2023 ; Accepted March 30, 2023)

In general household, dusts are usually removed by a vacuum cleaner that may wind up small dusts with an exhaust air. It may cause significant noise and sometimes allergic symptoms. A lint roller can be used for clean and less noisy dust removal. However, it produces additional waste of adhesive tapes. The purpose of this research is to develop an electrostatic lint roller that can easily catch and release dust by an electrostatic force without any noise and additional waste. The proposed lint roller has a cylindrical high voltage electrode covered by an insulating layer with two reference wire electrode on the both edge of the cylinder. The cleaning characteristics were obtained experimentally by the collection rate of 64 cotton threads chosen as dust. The measured collection rates were increased with decreasing the surface resistivity of the base material, ρ_s , the rolling speed, v , and with increasing the contact width of the reference electrode, W , as predicted by the calculated electrostatic force from an equivalent circuit model. The collection rate become 100% at an applied voltage of -5 kV. The cotton threads on the roller can be accumulated to the collection unit and easily transported to the garbage.

1. はじめに

日常生活で発生するホコリの除去には電気掃除機が多く用いられている。これは、強力な吸引力で大小様々なゴミやホコりを吸い込むことが可能な一方で、強力な排気も伴う。この排気が周囲の未回収のホコりを飛散させ、回収しにくくすることもあれば^{1,2)}、飛散したホコりを吸い込むことで、不快感やアレルギー症状に発展する危険性もある^{3,4)}。周囲への配慮として大きなモーター音を嫌がる人も多く、電力消費の大きさも無視できない。

静音で省エネかつ簡便なホコリ除去としては、粘着式ロールクリーナーがある。強力な粘着力でロールの表面にホコりを粘着させるが、ホコリが付きすぎると十分な粘着力が得られなくなるため、テープを剥がして新しい粘着面を出す必要がある。剥がす際には直接ホコリに手が触れるため、衛生的に問題があり、ホコリ以外の新たなゴミ(粘着済みテープ)を生み出すことにもなる。テープの粘着力ではなく、繊維状の素材(ワイパー)にホコりを絡めとり、ワイパーごと廃棄する方法もあるが、ホコリ以外のゴミを

生み出してしまう点では粘着式クリーニング法と同じである。

一方、ホコリという微小物体を補足し、ゴミ箱の中に移動させればよいという作業であれば、静電気力を活用できる可能性がある。その一例として、微粒子をターゲットとした静電チャックが提案されている^{5,6)}。筆者らは、ここで用いる吸着電極を回転可能な円筒型にすることで、静電気力を利用したロール型のクリーナーを実現できないかと考えた。静電気力でホコりを吸着・除去することができれば、省エネ、簡便、静音、かつホコリ以外のゴミを出さない新たなクリーニング法になりうる。本研究では、この静電式ロールクリーナーの吸着機構を表現する等価回路モデルを提案するとともに、試作したクリーナーを用いてホコリを模擬した木綿糸の吸着・脱離特性を明らかにした。

2. 静電式ロールクリーナーの概要

2.1 クリーナーの構造と吸着原理

試作したクリーナーの一例を Fig. 1(a) に示す。市販の粘着式ロールクリーナーの芯に回転可能な静電吸着電極を設けた。Fig. 1(b) に示すように転がせば、吸着ユニットにホコリを吸着させることができる。吸着ユニットの作製手順を Fig. 1(c) に示す。まず、(1) 円筒形のボディーを作り、(2) その表面に円筒状高電圧電極(アルミテープ)を貼り、(3) その上から絶縁被覆(厚み 50 μm のテフロン性フィルム)を施した。最後に絶縁被覆の上から(4) 円筒の両端に円環状の基準電極を施した。円筒電極の直径は 55 mm、長さ

キーワード: ホコリ, 静電誘導, 高電圧, 静電気力, クリーナー

* 山形大学大学院 理工学研究科

(〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510, Japan

¹ toshi@yz.yamagata-u.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2023.47.3.121>

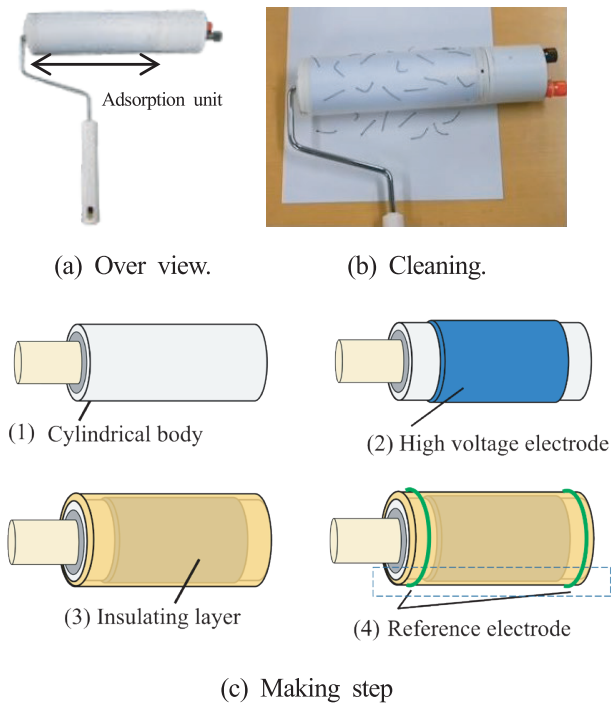


図1 静電吸着式ロールクリーナー
Fig.1 An electrostatic lint roller.

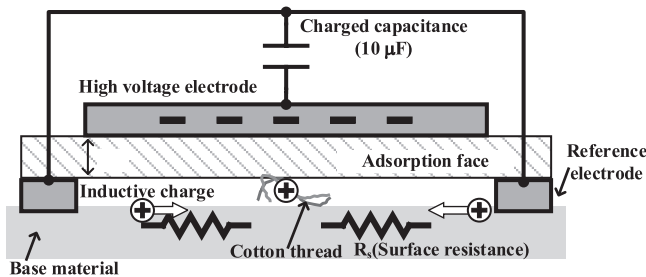


図2 ロールクリーナーの電極構成
Fig.2 Electrodes of the electrostatic lint roller.

は 150 mm であり、基準電極は直径 100 μm の金属線である。高電圧電極と基準電極の間には 10 μF、耐圧 1.2 kV のコンデンサが接続されており、これを充電することで両電極間に電位差を与える。

Fig. 2 は、Fig.1(c) の点線で囲まれた部位がホコリの乗っている面（ベース材）に接触している状態の断面を等価回路で示している。高電圧電極に負の電圧を充電すると、基準電極からホコリまでの表面抵抗 R_s を介して正の電荷がホコリに誘導され、静電引力により高電圧電極の絶縁被覆部に吸着する（以下、静電吸着）。ホコリとベース材がともに導電性をもちないような誘導帯電は起こらないが、大気中の水分の付着によりわずかでも導電性を有している場合は静電吸着できると考えている。なお、高電圧電極は完全に絶縁被覆されており、吸着ユニットの表面を手で触れても電撃を受けることなく安全であることを確認している。

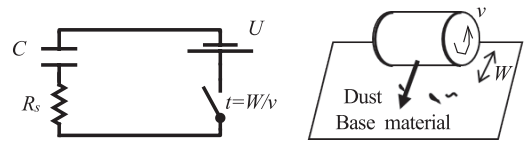


図3 等価回路モデル
Fig.3 Equivalent circuit model.

2.2 ホコリ吸着モデル

ホコリに誘導される電荷 q は、ホコリと高電圧電極との間の静電容量 C に比例する大きさになる。その充電速度は表面抵抗 R_s と C による時定数で決まり、充電後の q は Fig. 3 の充電等価回路が閉じている時間 t で決まる。時間 t は円筒電極の回転周速度 v と基準電極がベース材に接触している長さ（接触幅 W ）を用いて、 $t = W/v$ と考えることができるため、高電圧電極への印加電圧を U とすると、ホコリの電荷 q は式(1)で与えられ、静電吸着力 F は式(2)で与えられる。

$$q = CU \left(1 - e^{-\frac{W}{R_s C v}} \right) \tag{1}$$

$$F = qE = \frac{C}{d_c} U^2 \left(1 - e^{-\frac{W}{R_s C v}} \right) \tag{2}$$

ただし、式(2)の d_c は高電圧電極表面の絶縁被覆の厚みである。式(2)は、a) 印加電圧 U が大きいほど、b) 抵抗 R_s が小さいほど、c) 接触幅 W が大きいほど、d) 周速度 v が小さいほど、静電吸着力が大きくなることを解析的に示している。この吸着モデルの妥当性を検証するためには、前記 a)~d) の各パラメータがホコリの吸着特性に及ぼす影響を実験的に把握する必要がある。

3. 実験方法

一般家庭のホコリ成分は繊維（綿ホコリ）が 56% を占めている⁷⁾ ことから、本研究では直径約 0.2 mm、長さ 2 cm の木綿糸（藤久、手縫糸 #40 28/2）をホコリのサンプルとして用いた。ベース材上の 15 cm × 15 cm の範囲に木綿糸を 64 本（ $=N_b$ ）撒き、クリーナーを 1 回だけ通過させたあとにベース材に残留した木綿糸（ $=N_o$ ）を数えて、式(3)より捕集率 [%] を算出した。捕集率は実験を 5 回行ったときの平均値と標準誤差で示した。式(2)が R_s に依存していることから、Table. 1 に示す表面抵抗率 ρ_s を持つ金属板、畳、コピー用紙、ポリエチレン製床マット、カーペットをベース材として用いた。なお、表面抵抗率 ρ_s は大きさにより 3 つに分類され、 $10^5 \Omega/\text{sq}$ 以下では導電性、 $10^5 \sim 10^{12} \Omega/\text{sq}$ の範囲では静電気拡散性、 $10^{12} \Omega/\text{sq}$ 以上では絶縁性とされており⁸⁾、ベース材の表面抵抗率 ρ_s と表面抵抗 R_s は比例

表1 ベース材の表面抵抗率
Table 1 Surface resistivity of the base material.

Base material	Surface resistivity ρ_s [Ω/sq]
Metal plate	Less than 10^3
Tatami	9.86×10^{10}
Paper	2.57×10^{13}
Polyethylene mat	Over than 10^{14}
Carpet	Over than 10^{14}

関係⁹⁾にある。

$$\text{捕集率} [\%] = (N_b - N_o) / N_o \times 100 [\%] \quad (3)$$

印加電圧 U 、クリーナーを押す速度および接触幅 W を変化させたときの捕集率を測定した。なお、捕集率が100%になると、パラメータの変化による影響が見えないため、必要に応じて印加電圧 U を調整した。

4. 木綿糸の静電吸着特性

4.1 ρ_s , v および W の影響

各ベース材での捕集率をまとめて Fig. 4 に示す。印加電圧の増加とともに捕集率は増加し、ベース材が金属の場合はホコリはほぼ完全に除去できた。一方、表面抵抗率 ρ_s が高い材料ほど捕集率が低下する傾向にあり、ベース材がポリエチレンマットやカーペットのときには捕集できなかった。これは、印加電圧 U が十分に大きくはないことと、 ρ_s が高くなることで基準電極からホコリまでの表面抵抗 R_s が大きくなって誘導電荷が移動しにくいこと等が原因と考えられる。

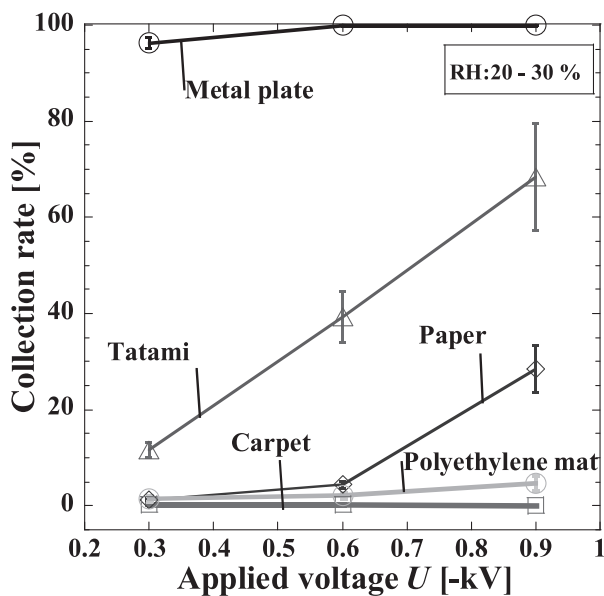


図4 木綿糸の吸着特性
Fig.4 Collection rate of cotton threads.

ベース材として紙を用い、クリーナーを押す速度を変化させたときの捕集率を Fig. 5 に示す。押す速度を増加させると捕集率は減少する傾向がみられた。これは、押す速度とともにロールの周速 v が大きくなることで、ホコリに電荷を誘導する時間 t が短くなるためと考えられる。

接触幅 W を広げることを目的に基準電極として導電ゴム（表面抵抗 $3.9 \times 10^5 \Omega$ ）を用いた。押しつけ圧により導電ゴムが歪むことで、金属線の基準電極よりも W が7倍程度広がる。Fig. 6 に示すように、導電ゴムに替えることで、捕集率を大きく改善することができた。これは、表面抵抗 R_s が等価的に小さくなることと、充電時間 t が大きくなることが原因と考えられる。

このように、ホコリの捕集率の増減は、式(2)の各パラ

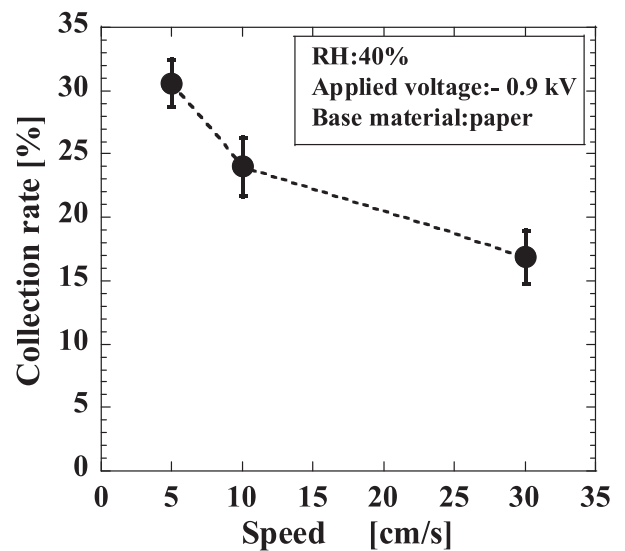


図5 ローラーを押す速さと捕集率の関係
Fig.5 Relationship between pushing speed and collection rate.

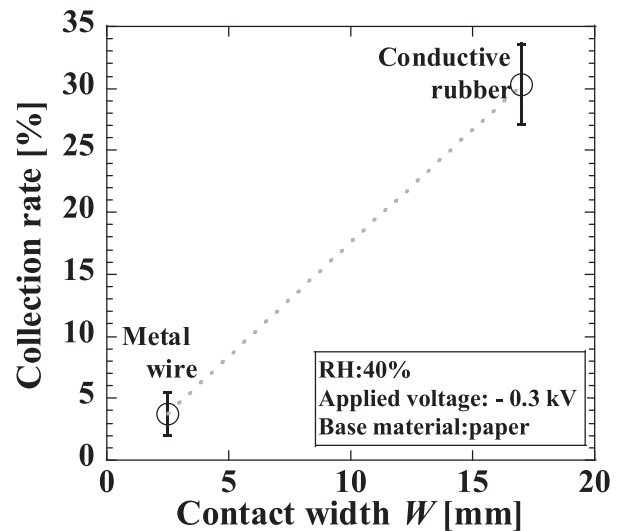


図6 基準電極の接触幅 W と捕集率の関係
Fig.6 Relationship between W and collection rate.

メータを変化させたときの静電吸着力の増減と定性的に一致する結果となり、提案した吸着モデルが妥当であることが確認された。以下では、捕集率をさらに向上させるための工夫について述べる。

4.2 ベース材への前処理の効果

式(2)と4.1の実験結果から明らかなように、ベース材の表面抵抗率が大きいと高い捕集率が得られなかった。そこで、絶縁性のベース材に対して表面処理することにより、表面抵抗率を小さくして捕集する方法について検討した。居住空間の臭気緩和として消臭スプレーや除菌スプレーをかける行為は日常的に広く行われており、その成分の中には界面活性剤が含まれているため、床や壁などのベース材の表面抵抗を低減できると考えた。Fig. 7のように市販の除菌スプレー（花王、リセッシュ除菌EX）をベース材に噴霧した。1回のスプレーで0.22 mg/cm²のスプレー液が噴出される。十分に乾燥させた後、前節と同様の方法で捕集率 [%] を測定した。

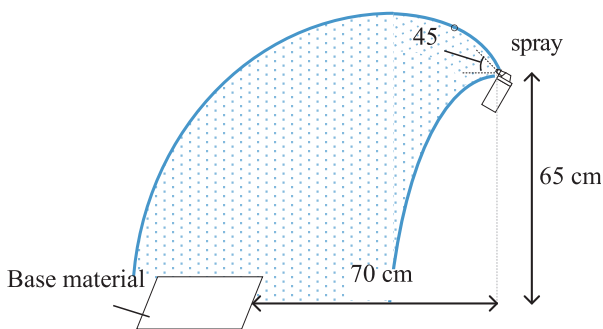


図7 スプレー方法
Fig.7 Spraying method.

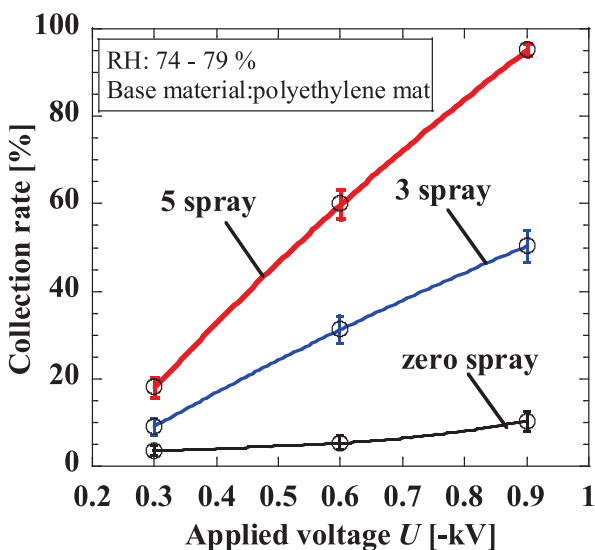


図8 前処理スプレーによる捕集率の変化
Fig.8 Effect of spray treatment.

Fig. 8 に示すように、スプレー回数を増やすほど捕集率は向上し、5回スプレーでは印加電圧-0.9 kVのときにほぼ完全に木綿糸を捕集できることが分かった。このときのベース材の表面抵抗率の分布を Fig. 9 に示す。市販の表面抵抗率測定計（Trek 社製 Model 152）を用いて測定位置をずらしながら表面抵抗率を測定した。未処理時に 10¹⁴ Ω/sq 以上であったベース材の表面抵抗率は、3回スプレーで 10⁹ Ω/sq に、5回スプレーで 10⁸ Ω/sq にまで低下していた。ベース材の表面にはスプレーに含まれる界面活性剤が残るため、大気中の水分を吸着することで表面抵抗が低下したものと考えられる。

Fig. 9 の黒枠で囲まれた部分でクリーナーを通過させた後のホコリの残留は、Fig. 10 のように分布しており、Fig. 9 と対応させると表面抵抗率が 10¹⁰ Ω/sq 以上の場所ではホコリの吸着が困難であることも分かった。このようなスプレーを日常的に行っている環境であれば、ベース材が絶縁物であっても十分な吸着力が得られることが分かった。

4.3 印加電圧Uの増大による効果

式(2)、4.1 および4.2の結果からも分かるように、ホコリに加わる静電気力は印加電圧 U に大きく依存しているため、捕集率の向上には U の増大も効果的であると見込まれるが、前節までのクリーナーはコンデンサの耐圧である 1.2 kV 以上の電圧を印加することができず、捕集率が

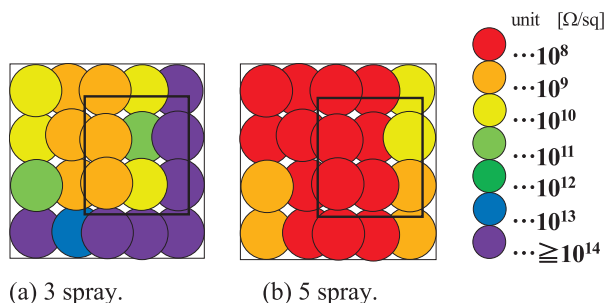


図9 前処理スプレー処理後の表面抵抗率
Fig.9 Surface resistivity of the base material.

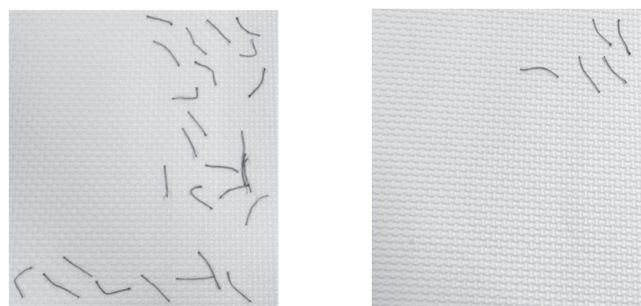


図10 ベース材に残留した木綿糸
Fig.10 Remaining cotton thread. (U=-0.9 kV)

不十分な場合もあった。そこで、DC/DC コンバータ (EMCO AG50) とモバイルバッテリー (Poweradd Slim2 5000mAh) を内蔵し、高電圧電極を最大 -5 kV まで昇圧することが可能な Fig. 11 のクリーナーを試作し、前節までと同様の方法で捕集率を調べた。このクリーナーの吸着ユニットは Fig. 1 と同じ構造に作製したものであるが、内部に電源を内蔵するために円筒の直径を 10 cm に大きくしている。ロール側面のつまみにより印加電圧の大きさを調整できる。

4.1 では捕集が困難であった未処理の絶縁性のポリエチレンマットと、前項と同様に界面活性剤を含んだスプレーで処理を行ったポリエチレンマットを用いて捕集率を測定した。

Fig. 12 に示すように、未処理のマットにおいても印加電圧 U を大きくすると捕集率は向上し、印加電圧 -5 kV では 8 割程度に達した。Fig. 4 において捕集率が小さかったのは、印加電圧が十分ではなかったことが分かった。また、ベース材の表面処理を行えば、印加電圧 U が -2.0 kV 程度でもほぼ完全にホコリを捕集することができた。



図 11 改良したクリーナー
Fig. 11 An improved electrostatic lint roller.

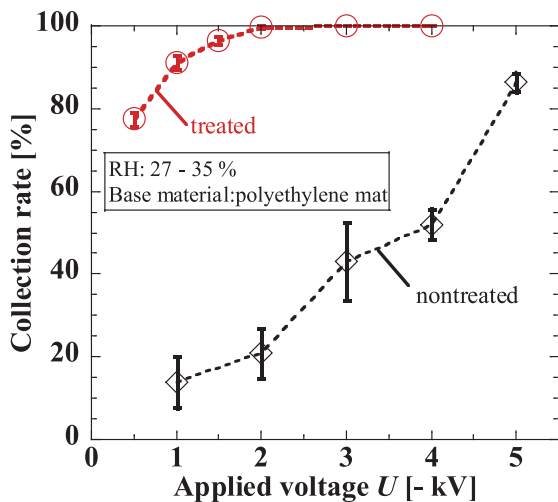


図 12 改良したクリーナーの綿糸吸着特性
Fig. 12 Collection rate using the improved cleaner.

5. ロールーに吸着したホコリの脱離法の検討

ローラーに吸着したホコリを脱離する手法について、Fig. 13 に示す 2 つの方法で検討した。(a) は粘着式ロールクリーナーと同じようにロール表面にホコリを吸着し続け、それ以上吸着できなくなった段階でゴミ箱の上で一気に入荷を除電して脱着する方法である。一方、(b) はホコリを吸着した面が再びベース材に接触する前にホコリを回収する手法である。高電圧電極が一周する途中にホコリ脱離ユニットを設け、ホコリを機械的に引っかけて回収する。なお、ホコリを引っかくスキージには基準電極と同電位となる導電性材料を用い、回収した際にはホコリの電荷も除去する。

界面活性剤を含んだスプレーで前処理を行ったポリエチレンマットをベース材として用い、ホコリの吸着を繰り返したときの捕集率を調べた。Fig. 14 に示すように、(a) の方法ではローラー動作 10 回目で 85% まで低下し、さらにローラー動作を続行すると捕集率は大きく減少し、マイナスの値にまで低下した。これは、ベース材にホコリが付いた状態でローラーを通過させても、ベース材の上のホコ

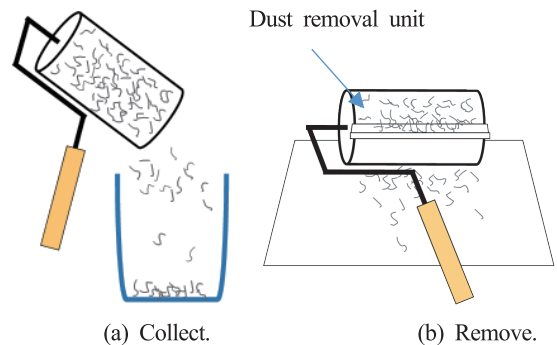


図 13 吸着した木綿糸の脱着方法
Fig. 13 Desorption method.

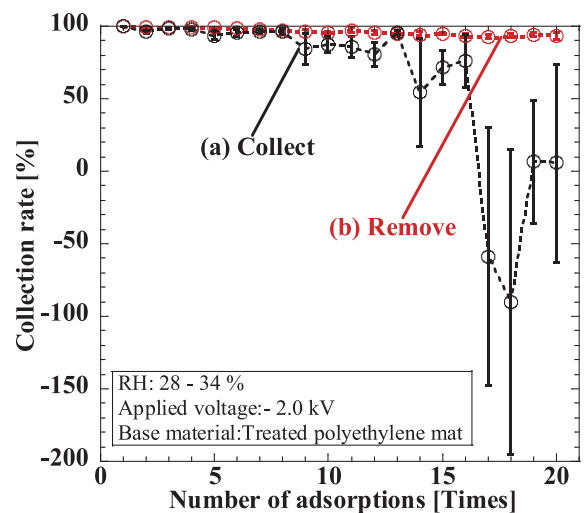


図 14 脱離動作を伴う捕集率の推移
Fig. 14 Collection rate with the dust removal.

りが減らずに増えてしまうことを示している。一旦ローラーに捕集したホコリが高むことで重くなり、自重でベース材の上に落下したことが原因である。したがって、ホコリを高電圧電極上に吸着させたままローラーを動かすのは、必要でないところでホコリを脱離させてしまう可能性が高いことが分かった。

一方、(b)の方法では、ローラー動作1回目で100%だった捕集率が20回繰り返しても90%以上を維持しており、安定して高い捕集率が得られた。これは、吸着したホコリをその都度ローラーの表面から脱離させて回収することで、ベース材の上にあるホコリの静電吸着を邪魔しないことと、回収したホコリがベース材に落ちることが無かったためと考えられる。脱離ユニットに回収されたホコリをまとめてゴミ箱に落下させる機構を設ければ、手を汚さず、無駄なゴミを出さずにホコリだけを廃棄できるシステムが構築できることが分かった。

6. おわりに

静電チャックの原理を応用したロール型のクリーナーを試作し、ホコリを模擬した木綿糸の吸着・脱離性能を調べた。また、等価回路を用いたホコリ吸着モデルを提案するとともに、捕集率の測定結果によりその妥当性が確認された。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) ホコリの捕集率は、高電圧電極への印加電圧 U 、基準電極からホコリまでの表面抵抗 R_s 、回転するローラーの周速 v 、基準電極とベース材の接触幅 W で決まる。
- 2) 高電圧電極の印加電圧を十分大きくすれば、ベース材の材質によらず十分な捕集を実現できる。
- 3) 除菌スプレー等を行うと、ベース材の表面抵抗が下がることで、より低電圧での捕集が可能となる。
- 4) ローラー回転時に吸着したホコリを回収する脱離ユニットを用いれば、高い捕集率を維持しながら繰り返す

捕集することができる。

- 5) 上記4)の動作で回収したホコリは除電されており、簡単にゴミ箱に捨てることができる。

実際のホコリは、本実験で使用した木綿糸よりも細くて軽いものが多いと考えられるが、木綿糸よりも大きいものや形状が異なるものもある。今後は、実際のホコリを用いて本方式の実用性を確認する予定である。

参考文献

- 1) 永井 智, 伴 武, 鈴木政宏, 高野勝幸, 小笠原章, 繁田明, 横須賀道夫, 榎本雅夫: 164 室内環境整備技術の開発 I. フローリング床におけるダニ/スギ花粉アレルギーの量及びその動態. アレルギー, **53** [2-3] (2004) 329
- 2) 高野勝幸, 永井 智, 伴 武, 鈴木政宏, 小笠原章, 繁田明, 横須賀道夫, 榎本雅夫: 165 室内環境整備技術の開発 II. フローリング床上の清掃方法とそのチリダニアレルギー量. アレルギー, **53** [2-3] (2004) 330
- 3) 齋藤洋三: 鼻アレルギーと吸入性アレルギー. 耳鼻咽喉科臨床, **60** [11] (1967) 909-917,
- 4) 成田慎一郎, 朝倉光司, 白崎英明, 齋藤博子, 小笠原英樹, 石井 歙, 渡辺雅子, 東 英二, 形浦昭克: 札幌医大鼻アレルギー外来の臨床統計. 耳鼻咽喉科臨床 補冊, **1995** (1995) 42-48
- 5) 大森琢磨, 杉本俊之: 粉粒体用静電チャックの基礎特性と人工播種への応用. 静電気学会誌, **42** [4] (2017) 73-74
- 6) 山形大学: 静電吸着装置. 特願 2018-097082
- 7) 越智佳世, 桂 禎邦: 室内塵中の成分分析. 一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集, **62** (2010) 158
- 8) N. Jonassen: *Electrostatics*, **56**, Chapman&Hall, Atlanta (1998)
- 9) 日本工業規格 JIS C 2139: 固体電気絶縁材料—体積抵抗率及び表面抵抗率の測定方法 (2008)