立体物静電植毛加工の高品質化を目指した静電場シミュレーションの活用

長谷川 孝^{*,†}・小畑 輝^{**}

^{*} 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター開発本部開発第一部電気電子技術グループ 東京都江東区青海2-4-10(〒135-0064)

^{**} 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター事業化支援本部多摩テクノプラザ電子・機械グループ

東京都昭島市東町3-6-1 (〒196-0033)

[†] Corresponding Author, E-mail: hasegawa.takashi@iri-tokyo.jp

(2019年4月11日受付, 2019年6月20日受理)

要 旨

オーダーメイド仕様の商品展示用ディスプレイへの植毛加工は、既存の大量生産ラインによる植毛が困難であるため、手持ち式ポータブル植毛装置が使用されている。本装置で高品質な植毛を行うためには、装置と被植毛品との間の最適な距離（最適植毛距離）の決定が重要となる。しかしながら、これを現場で行うには作業者に熟練した技術ノウハウが要求される。本研究では、商品展示用ディスプレイ向け植毛品として球体、円柱および円錐を選択した。熟練技術ノウハウに乏しくても、当該植毛品において最適植毛距離を決定できるようにするため、3D対応の静電場シミュレーションを活用した。シミュレーション結果から最適植毛距離を決定し、植毛実験によって結果の妥当性を確認した。

キーワード：球体・円柱・円錐、手持ち式ポータブル植毛装置、最適植毛距離、熟練技術ノウハウ、静電場シミュレーション

1. 緒 言

近年、商品展示用ディスプレイ向けの静電植毛の需要が増加している。商品展示用ディスプレイへの静電植毛は、種々の平面や曲面で構成された立体物に対する植毛であり、サイズも大小さまざまである。オーダーメイド仕様の一点ものであるため、既存の大量生産ラインによる植毛が困難となっている。そのため製造現場では、小型・軽量で、種々の立体形状に植毛できる手持ち式ポータブル植毛装置が使用されている^{1,2)}。本装置で高品質な植毛を行うためには、植毛前に現場作業者が装置と被植毛品との間の最適な距離（最適植毛距離）を決定する必要がある。しかしながらこれを実現するには、作業者に熟練した技術ノウハウが要求される¹⁾。

筆者らは、商品展示用ディスプレイへの静電植毛に対して、作業者が熟練技術ノウハウに乏しくても手持ち式ポータブル植毛装置で高品質な植毛を行えるようにするため、最適植毛距離の決定に際して静電場シミュレーションの活用に取り組んでいる。これまでに被植毛品として、厚さの影響が出ない薄板を対象とした活用事例を文献1) にて報告した。

本研究では、前記報告結果を基にして、被植毛品として立体物である球体、円柱および円錐を選択し、当該植毛品の最適植毛距離の決定に際して3D対応の静電場シミュレーションの活用を試みた。シミュレーションの解析結果から決定した最適植毛距離については植毛実験を行い、妥当性を確認した。

2. 解析および実験

2.1 静電場解析

2.1.1 使用ソフト

静電植毛製品は、植毛前工程で被植毛品に静電的に導電性機能を有する水溶性接着剤を塗布する³⁾。植毛装置と接着剤で導電化された被植毛品表面との間には、高電圧印加によって電場が形成される。これにより、植毛パイルがクーロン力によって植毛装置から被植毛品表面に向かって飛翔する³⁾。本研究では、植毛装置のパイル吐出口を想定した円板電極と被植毛品を対象として、3D-CADであるDassault Systemes SolidWorks社製SOLIDWORKSでCADデータを作成後、SOLIDWORKSアドイン電磁界解析ソフトであるEMWorks社製EMS2017を使用してシミュレーションによる静電場解析を行い、最適植毛距離を決定した⁴⁾。

2.1.2 最適植毛距離の決定方法

筆者らは、過去に厚さの無視できる正方形薄板を対象とした場合、薄板が置かれたアース板中心部においては、133 mmが最適植毛距離であることを文献1) によって導出した。本研究ではこのときの評価モデルをSOLIDWORKSとEMS2017によって再現した。Fig. 1は斜め上からモデルを眺めた図であり、Fig. 1の赤色円板電極は文献1) における植毛装置のパイル吐出口に相当し、青色部分は同文献記載のアース板に相当する。文献1) では、最適植毛距離が133 mmのとき、アース板に対する円板電極の最接近部分はアース板の中央直上でアース板端面にいくほど円板電極との距離は離れる。Fig. 1でも同様に配置しており、円板電極の最接近部分はアース板の中央直上にあり、その距離は133 mmである。本研究では、上記モデルにお

【図表について】 電子ジャーナルサイト「J-STAGE」ではカラーでご覧いただけます。https://www.jstage.jst.go.jp/browse/shikizai/-char/ja/

Fig. 1 Analysis model of the aluminum plate in Reference 1.

いてアース板の最大電場強度を導出し、基準値として用いることとした。

円板電極と立体物植毛品間の距離 (Fig. 2中の l) を5 mm刻みで変化させたときの被植毛品表面における最大電場強度についてもSOLIDWORKSとEMS2017を使用して導出し、グラフにしてまとめた⁴⁾。本研究で用いた三種類の立体物植毛品の評価モデルをFigs. 2~4に示す。Figs. 2~4はすべて正面から見た図であり、各図の赤色部分は植毛装置のパイル吐出口に該当する円板電極で、青色部分は被植毛品をあらわしている。

基準値をグラフに重ね合わせ、基準値よりも小さい最大電場強度を有する l の最小距離を立体物植毛品における最適植毛距離として決定した。

2.1.3 解析対象および解析条件

本研究では円板電極については直径100 mmのアルミ製円板を、また文献1)において最適植毛距離133 mmの決定に使用されたアース板については、Fig. 1に示すように、1辺の長さ1,000 mmのアルミ製正方形板を解析対象とした。被植毛品としては、Figs. 2~4に示すように、800 mm dia.の発泡スチロール製球体、底面800 mm dia.で高さ800 mmの発泡スチロール製円柱、底面800 mm dia.で高さ693 mm (斜辺800 mm)の発泡スチロール製円錐を解析対象として選択した。ここにFigs. 1~4において色の分布は電位の分布をあらわしている。

シミュレーションでは円板電極の被植毛品対向面に70 kV、アース板および被植毛品の表面に0 Vの電位をそれぞれ与え、円板電極とアース板間および被植毛品間に直流70 kVの高電圧を印加した (Figs. 1~4参照)。

2.2 植毛実験

2.2.1 試験品の作製

シミュレーションで得られた最適植毛距離に対する結果の妥当性を確認するため、植毛専業メーカーの工場 (生産現場) において試験品を作製した。

(1) 構成材料

静電植毛加工製品は被植毛物体 (基材)、接着剤、パイルまたはフロックと呼ばれる短繊維から構成される³⁾。試験品の基材には2.1.3項に記載した発泡スチロール製球体、円柱および円錐を、接着剤にはパイルと同じ色の染料を5%程度混入したアクリルエマルジョン系接着剤を、パイルには太さ3デニール、長さ1 mmのナイロン繊維をそれぞれ用いた¹⁾。ただしパイル

Fig. 2 Analysis model of a styrofoam sphere.

Fig. 3 Analysis model of a styrofoam column.

Fig. 4 Analysis model of a styrofoam cone.

の色については、球体に赤色、円柱に黄色、円錐に青色を選択した。

(2) 作製プロセス

試験品は以下の手順で作製した。最初に2.1.2項の方法によって決定した最適植毛距離で植毛加工するためのゲージを用意した。ゲージはアクリル板をレーザー加工機で切断して作製した。ゲージの寸法は、(3.1項記載の最適植毛距離) $\times$ 20 mm $\times$ 3 mmとした。次にスプレーガンを用いて基材に接着剤を塗布した。次いで手持ち式ポータブル植毛装置にパイルを供給し、ゲージを用いて植毛距離を調整後、植毛装置電源を投入して70 kV印加して植毛を開始した。植毛加工中は植毛距離をできるだけゲージ寸法に合わせて作業した。植毛装置はできるだけ一定速

度になるよう手動で移動させ、底面を除く試験品全体に対してまんべんなく植毛した。最後に接着剤を乾燥させて試験品を仕上げた。一例として、正面から見た球体における植毛加工の様子をFig. 5に示す。

2.2.2 試験品の評価

作製した試験品を用いて評価を実施した。評価は色見本を用いた色差測定^{1,5)} および目視による品質検査で行った。色見本は植毛メーカーが営業時に植毛見本として使用しているもので、市販のカッティングシートに太さ3デニール、長さ1 mmのナイロン繊維をコンペア式植毛装置で植毛して作製された。本研究では色見本の中で試験品と同じ色のものを選択した。本研究で選択した色見本の外観写真をFig. 6に示す。色差については、スガ試験機製携帯分光測色計CC-mを使用し、アパーチャー径を10 mm dia., 光源視野をD65光源10度視野に設定し、色見本と、試験品の任意の10ポイントにおける明度 L^* および色度 a^* , b^* を測定した。測定値を基に、色見本に対する明度差 ΔL^* および色差 Δa^* , Δb^* およびCIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差: ΔE^*_{ab} の10ポイント平均値および標準偏差を算出して測定データと

Fig. 5 State of the experimental flocking processing in a styrofoam sphere.

Fig. 6 Colour Sample (nylon pile of 3 denier and the length of 1 mm). (a) Sample for red pile flocked on a styrofoam sphere. (b) Sample for yellow pile flocked on a styrofoam column. (c) Sample for blue pile flocked on a styrofoam cone.

して用いた。目視による品質検査では、植毛メーカーの検査基準に基づいて植毛メーカーと協力して実施した。

3. 結果および考察

3.1 静電場解析

文献1)で報告した薄板に対する最適植毛距離133 mmに関して、EMS2017でシミュレーション解析したアース板の電場強度分布をFig. 7に示す。本結果よりアース板の最大電場強度(基準値)は約195 kV/mであった。また2.1.2項記載の球体表面におけるグラフをFig. 8に、Fig. 8の l が135 mmのときの電場強度分布をFig. 9に、円柱表面におけるグラフをFig. 10に、Fig. 10の l が130 mmのときの電場強度分布をFig. 11に、円錐表面におけるグラフをFig. 12に、Fig. 12の l が130 mmのときの電場強度分布をFig. 13にそれぞれ示す。Fig. 8~13より、最適植毛距離として、球体では135 mm、円柱および円錐では130 mmがシミュレーション解析によって決定された。

3.2 植毛実験

3.1項で示した最適植毛距離において2.2.1項の手順に従い試験品を作製し、2.2.2項の手順で評価した。試験品の色見本に対する色差測定結果をTable 1に、試験品の外観写真をFig. 14に

Fig. 7 Analysis result of electric field strength of the aluminum plate in Reference 1.

Maximum electric field strength
[V/m]

Fig. 8 A graph summarizing analysis results of electric field strength in a styrofoam sphere.

Fig. 9 Analysis result of electric field strength of a styrofoam sphere where $l = 135$ mm.

Fig. 10 A graph summarizing analysis results of electric field strength in a styrofoam column.

Fig. 11 Analysis result of electric field strength of a styrofoam column where $l = 130$ mm.

それぞれ示す。Table 1においては、 ΔE^*_{ab} の記載値が小さいほど色見本に近い仕上がりであることを示している^{1,5)}。Table 1より球体および円錐の ΔE^*_{ab} の平均値は5以下であり、色見本に近い仕上がりと考えられる。円柱の ΔE^*_{ab} の平均値については、球体および円錐の値と比べて約5倍大きい、標準偏差においても2倍以上の差があるため、植毛条件の不具合によるもので

Fig. 12 A graph summarizing analysis results of electric field strength in a styrofoam cone.

Fig. 13 Analysis result of electric field strength of a styrofoam cone where $l = 130$ mm.

はなく、基材である発泡スチロールの表面形状に起因していると考えられる (Fig. 14 (b) 参照)。植毛メーカーと協力して植毛品質検査を実施した結果、球体、円柱、円錐ともメーカー品質基準をクリアしていた。植毛時間についても、球体および円錐では20～30分、円柱では約1時間で終了でき、接着剤の生乾きに起因した植毛不良⁵⁾も発生しなかった。シミュレーションで得られた距離をより短くした場合、今回よりもさらに植毛品質の良いものが作製できることも考えられるが、ワンショットの植毛範囲が狭くなり¹⁾ 植毛時間が増加するため、接着剤の生乾きなど、二次的な植毛不良の発生が懸念される。

以上より、試験品の色見本を用いた色差測定および植毛メーカーの検査基準に基づいた植毛品質検査によって、解析結果の妥当性を確認できた。これにより、シミュレーション解析で決定した植毛距離に合わせて植毛を施すことで、品質的に問題ない植毛製品ができることがわかった。

4. 結 言

本研究では、被植毛品として800 mm dia.の発泡スチロール製球体、底面800 mm dia.で高さ800 mmの発泡スチロール製円柱および底面800 mm dia.で高さ693 mm (斜辺800 mm) の発

Table 1 The measurement results using a colour-difference meter (averaged values and standard deviations of 10 points).

		Data obtained from color-difference measurement				Standard sample value *Reference data		
		ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*_{ab}	L^*	a^*	b^*
Sphere (red pile)	Average	1.62	1.51	1.56	3.10	22.90	49.90	30.92
	Standard deviation	0.82	1.20	1.47	1.32			
Column (yellow pile)	Average	5.04	-15.26	-3.13	16.46	71.60	25.18	88.70
	Standard deviation	1.99	2.31	1.54	2.88			
Cone (blue pile)	Average	1.86	-1.95	1.52	3.30	25.98	2.85	-47.48
	Standard deviation	1.22	0.83	1.03	1.35

(a)

(b)

(c)

Fig. 14 Exterior photographs of the prototypes manufactured by the procedure in Item 2.2.2. (a) The flocked sphere, where the flocking time is 20 to 30 minutes. (b) The flocked column, where the flocking time is about 1 hour. (c) The flocked cone, where the flocking time is 20 to 30 minutes.

泡スチロール製円錐を選択し、静電場シミュレーションを活用して当該植毛品の最適植毛距離を決定した。植毛実験を行い、試験品の色見本に対する色差測定および植毛品質検査によって、シミュレーション解析結果の妥当性が確認できた。これにより、立体物静電植毛における最適植毛距離の決定に際しては、3D対応の静電場シミュレーションが活用できることがわかった。

謝 辞

本研究の一部は、第42回静電気学会全国大会(2018/09/13-14)において発表され、関係各位より有益なコメントをいただいた。また試験品の作製および植毛品質検査は、日本特殊工業㈱相澤 剛氏の協力によるものであり、深く感謝する。

文 献

- 1) 長谷川 孝, 相澤 剛, 相澤洋一: *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **91**, 147 (2018).
- 2) 長谷川 孝, 宇井 剛, 殿谷保雄: *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **90**, 11 (2017).
- 3) 長谷川 孝, 殿谷保雄: 静電気学会誌, **40**, 148 (2016).
- 4) 長谷川 孝, 小畑 輝: 静電気学会講演論文集2018, 14pB-4, 255 (2018).
- 5) 長谷川 孝: *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **91**, 106 (2018).

Utilization of Electrostatic Field Simulation Aiming at High Quality of Electrostatic Flocking Process for Three-Dimensional Objects

Takashi HASEGAWA^{*,†} and Teru OBATA^{**}

** Electrical and Electronic Technology Group, Research and Development Department (Division I), Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 2-4-10 Aomi, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan*

*** Electronics and Mechanics Group, Tama Techno Plaza, Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 3-6-1 Azuma-cho, Akishima-shi, Tokyo 196-0033, Japan*

†Corresponding Author, E-mail: hasegawa.takashi@iri-tokyo.jp

(Received April 11, 2019; Accepted June 20, 2019)

Abstract

Flock finishes for exhibition displays, which are prepared to custom-made specifications, are difficult to create in an existing mass production line so a hand-held portable flocking machine is used. In order to perform high quality flocking with this machine it is important to determine the optimum flocking distance between the machine and the flocked object. However, the know-how of a skilled worker is needed to realize this at the field site. In the present study, as the flocked objects for exhibition displays, a sphere, a cylinder and a cone were selected. In order to be able to carry out high quality flocking with a handheld portable machine even if the worker skill and know-how is poor, a 3D-capable electrostatic field simulation was utilized to determine the optimum flocking distance of the above objects. To confirm the validity of the simulation result, flock finishing was carried out using analysis values obtained by the electrostatic field simulation.

Key-words: *Sphere/cylinder/cone, Hand-held portable flocking machine, Optimum flock distance, Skilled know-how, Electrostatic field simulation*