

論 文

カーボンファイバーパイルを用いた静電植毛面の光反射率の測定

井坂 勉*, 長谷川 晶一*, 寺島 俊介*, 關井 康雄^{*1}, 林 友直*

(2004年8月23日受付; 2005年3月9日受理)

Light Reflectance Measurement of Flocked Surface Using Carbon Fiber Pile

Tsutomu ISAKA,* Shoichi HASEGAWA,* Shunsuke TERASHIMA,*
Yasuo SEKII*,¹ and Tomonao HAYASHI*

(Received August 23, 2004 ; Accepted March 9, 2005)

A black surface was formed using electrostatic flocking with PAN (poly-acrylo-nitrile)-type carbon fiber pile. Using a Fourier transform infrared spectrometer equipped with a device for regular reflection measurement, we measured the reflectance of regular reflection for infrared rays. Results demonstrated that the reflectance of the carbon-fiber flocked surface was less than 0.1%. In addition to measurements of the reflectance of regular reflection, measurement of the reflectance of diffused reflection was also performed using a UV/VIS/NIR spectrophotometer equipped with integral sphere for near-infrared, visible and ultraviolet rays. Results showed that reflectance values of less than 1% were obtained for the carbon fiber flocked surface, thereby demonstrating that electrostatic carbon fiber flocking is a promising method for forming a black surface with very low reflectance. Considering the result of the estimation of pile length, we examined the difference of reflectance values between flocked surfaces using two kinds of carbon fiber pile.

1. まえがき

人工衛星などの宇宙機器で、搭載機器が正常に動作するには温度を許容される範囲内に収めることが必要であり、このための熱設計が重要である。熱制御の方法には受動型制御方式と能動型制御方式の2方式があり、このうちの受動型熱制御方式は衛星の材料や形状、機器配置などで決まる固有の熱物理特性を調整することにより、機器などの温度を所定の範囲内に収める方法である¹⁾。受動型熱制御方式の具体的な方法としてはコーティング法が広く用いられており、目的によって、放射率の小さい金メッキを施す方法や放射率の大きい黒色塗料を塗布する方法などが採用されている。

筆者らは以前より、黒体面に近い熱放射特性を有し、黒色塗料塗付面に比べて発熱体の熱放射に秀でた黒色面を形成できること期待されるカーボンファイバーパイルを用いた静電植毛面に注目し、その検討を進めてきた^{2,3)}。このたび、放射伝熱に関するキルヒホフの法則により固体表面の熱放射特性に密接に関連する光反射特性⁴⁾に着目し、太陽光の主要な波長領域をカバーする赤外光に対する試作植毛面の正反射率と、紫外・可視・近赤外光に対する拡散反射率を測定し、その結果について考察したので報告する。

* 千葉工業大学(275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

¹⁾ sekii@pf.it-chiba.ac.jp

2. カーボンファイバーパイルを用いた植毛面の特長

図1に示すように、カーボンファイバーパイルを垂直に植毛した面に光が入射した場合、入射光はカーボンファイバーパイル間で反射を繰り返し、その都度エネルギーの吸収が行われ、最終的にはほとんどの入射光が吸収されてしまう「光トラップ効果」が起こる。

このため、このようにして形成された黒色表面は黒体面に近い光学特性をもち、入射光に対する反射率の小さな面を形成することが可能と考えられる⁵⁾。

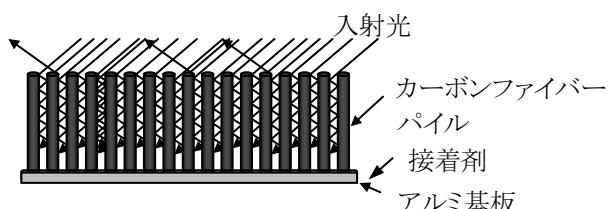


図1. カーボンファイバーフロッキング面の光トラップ効果

Fig.1 Light-trap effect of carbon fiber flocked surface.

3. カーボンファイバーパイルを用いた静電植毛面の作成 3.1 静電植毛の原理

静電植毛の技術は今日様々な用途に利用されているが⁶⁾、その原理はつぎの通りである⁶⁾。図2のような平行平板電極間に直流電圧を印加すると一様な電界Eを生じ、電極間に電荷qを持った小物体が存在していると $F=qE$ で与えられるクーロン力を受ける。下部電極間に上にカーボンファイバーパイルを載せ、これに電荷を与えれば正電極上にある

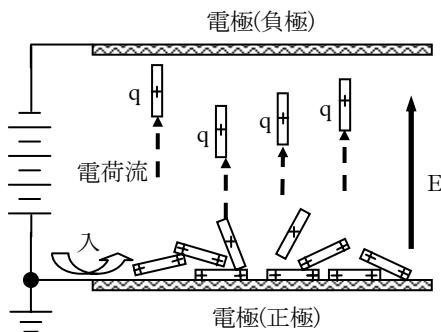


図2 静電界内の荷電体

Fig.2 Charged particles in an electrostatic field.

カーボンファイバーパイルはこのクーロン力により負電極に向かって飛翔する。カーボンファイバーパイルの飛翔方向に基板を配置し、基板に接着剤を塗布しておけば、接着剤塗布面にパイルが投錆され植毛が行なわれる。

3.2 実験装置及び実験方法

筆者らが用いた静電植毛面作製装置の概略図を図3に示す。装置は二枚の銅板電極を平行に配置し、下部電極上にカーボンファイバーパイルを載せる構造である。電極間距離は50mmである。植毛面作製は二液混合のエポキシ樹脂接着剤を塗布した 20mm×20mm のアルミニウム基板を上部電極に固定し、下部電極上にパイルを載せた後電圧を印加するという方法で行なった。反射率測定試料の作成に先立って、良好な植毛面を作製するための条件を把握するため、多くの試行実験を行なった³⁾。この試行実験により、接着剤を適量かつ均一に塗布することが良好な植毛面を作製する上で重要であることを確認したので、図4に示すような型枠を用い、これを基板に装着した後、プラスチック製の平板を基板上で摺動させ接着剤を均一に塗布する方法を採用した。

この方法により接着剤の均一な塗布面を実現させることができた。植毛面作製には発生電圧が負極性の直流電圧発生装置を用い、20kVの負極性直流電圧を20秒間印加してカーボンファイバーパイルを飛翔させ植毛させた。使用したカーボンファイバーパイルは東邦レーヨン社製のPAN (poly acrylo-nitrile) 系カーボンファイバーFT-200とFT-300

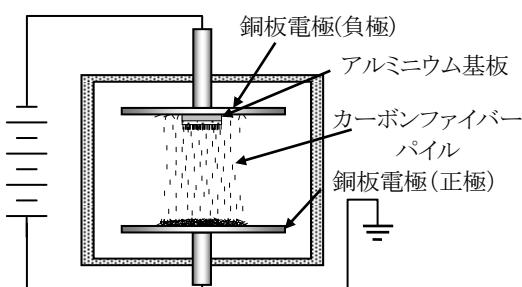


図3 静電植毛装置

Fig.3 A schematic of a device for electrostatic flocking.

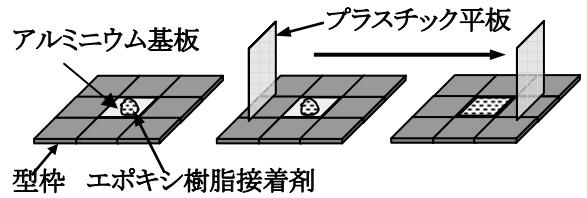
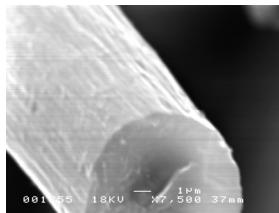
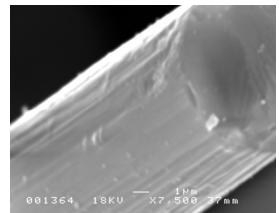


図4 型枠を利用した接着剤の塗布法

Fig.4 Method of adhesive application using a frame.



(a) FT-200



(b) FT-300

図5 FT-200とFT-300のSEM像 (倍率×7500)

Fig.5 SEM images of carbon fiber piles: FT-200 and FT-300.

FT-300のパイルでパイル直径はそれぞれ 10.2μm (FT-200)、および 11.3μm (FT-300) で、実測したパイル長さの平均値は 140μm (FT-200) および 350μm (FT-300) である。また、比重は 1.77、体積抵抗率は $10^{-6} \Omega \cdot m$ と報告されている⁷⁾。

3.3 電圧印加回数とパイル植毛量の関係

植毛面作製に先立って行った試行実験で 20 秒間のパイル飛翔 1 回のみでは不均一な植毛面ができる場合があることが判明したので、電圧印加の都度カーボンファイバーパイルを下部電極上に載せ、電圧印加回数 (すなわち、飛翔回数) を変化させ、基板上に植毛されるパイル量を調べた。

図6はFT-200を用いた場合の電圧印加回数と基板上に植毛されるパイル量の関係を示したものである。図に示すように、電圧印加を繰り返すことによって基板の単位面積あたりに植毛されるカーボンファイバーパイルの量も増加し、より均一な植毛面が得られることが確認できた。因みに、3 回の電圧印加に要する所要時間は 5 分未満であり、接着剤の硬化時間 (10 分) の 1/2 以下であったので、接着剤の硬化が起こる前に電圧印加 3 回を含む全ての作業を行うことが可能であった。この結果を受けて、反射率測定に供した植毛面は全て電圧印加を 3 回行なって作製した。図7は電圧印加回数 3 回の条件で作製した FT-200 植毛面と FT-300 植毛面の SEM 像の例である。

4. 植毛面の正反射率

4.1 測定方法

FT-200とFT-300の反射率測定用試料をそれぞれ 50 個作製し、正反射率の測定を行った。赤外光領域における正反

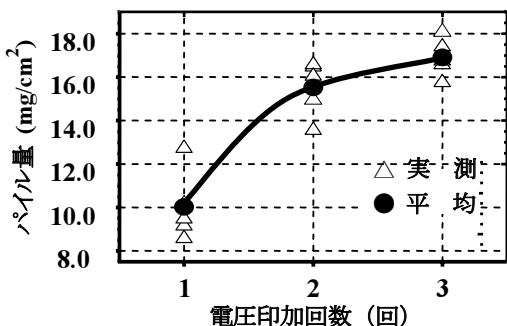


図6 電圧印加回数とパイル植毛量の関係

Fig. 6 Relationship between the number of voltage application and the amount of flocked carbon fiber piles.

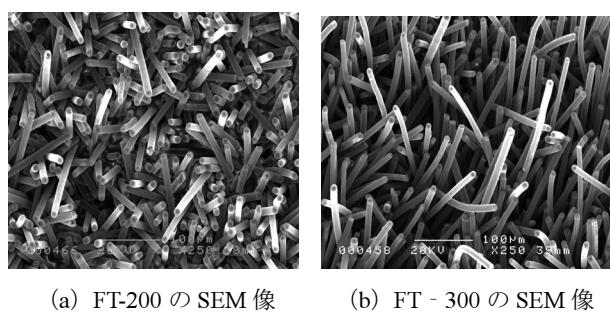


図7 FT-200 植毛面と FT-300 植毛面の SEM 像(倍率×250)
Fig.7 SEM images of surfaces flocked with FT-200 and FT-300 carbon fiber piles.

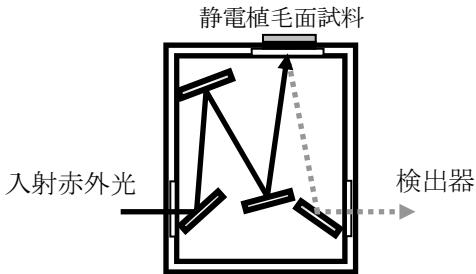


図8 正反射率測定装置

Fig.8 Device of reflectance measurement of regular reflection.

率の測定はFT-IR(フーリエ変換赤外分光光度計)に図8に示すような正反射率測定装置を取り付け、FT-IRの測定波長領域である2.5~10.0μmの赤外光に対する正反射率の測定を行った。測定には日本分光(株)製の赤外分光光度計FT/IR-670 Plusを用いた。

4.2 測定結果

図9はFT-300植毛面の正反射率スペクトルを黒色塗料塗付面のスペクトルと比較した結果である。これより、植毛面の正反射率スペクトルは黒色塗料塗付面に比べて値が小さいだけでなく、入射赤外光のほぼ全波長領域において小さいことがわかる。

図10はFT-200の植毛面とFT-300の植毛面の正反射率スペクトルである。FT-200, FT-300いずれのカーボンファイバーパイルを用いた場合にも反射率0.1%以下の低い反射

率を示している。とくに、FT-300を用いた植毛面の反射率が小さいことがわかる。FT-200植毛面とFT-300植毛面の反射率を定量的に把握するため、FT-200とFT-300の植毛面各50個の正反射率スペクトルから、波長2.5μm, 5.0μmおよび10.0μmにおける正反射率を求め、その分布を示すヒストグラムを作成した。図11に波長2.5μmおよび5.0μmにおける反射率のヒストグラムを示す。表1は各ヒストグラムより算出した反射率の平均値と標準偏差である。これより波長2.5μmと5.0μmの赤外光に対する各試料の正反射率の平均値はほぼ同じであることと、FT-300植毛面の正反射率はFT-200植毛面の正反射率よりも低くFT-200植毛面の反射率の約80%であることが確かめられる。

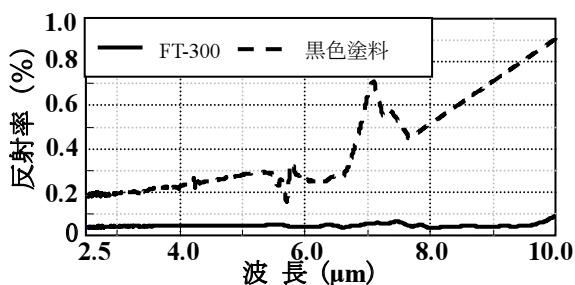


図9 黒色塗料塗付面とFT-300植毛面の正反射率スペクトルの比較

Fig.9 Reflectance spectra of a diffused reflection of a black-paint coated surface and a surface flocked with FT-300 piles.

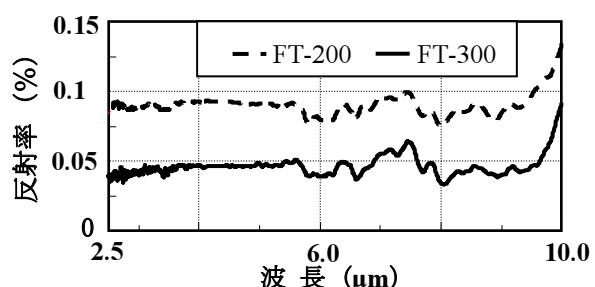
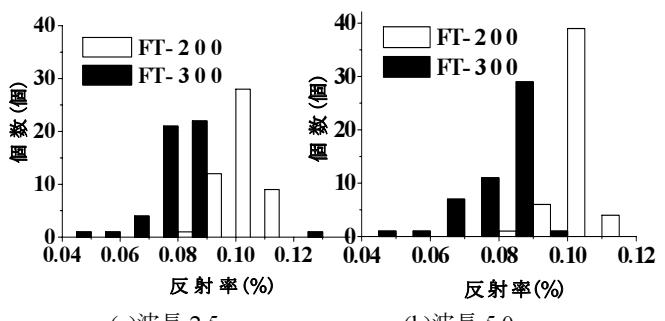
図10 FT-200植毛面とFT-300植毛面の正反射率スペクトル
Fig.10 Reflectance spectra of a regular reflection of flocked surface with FT-200 and FT-300 carbon fiber piles.

図11 正反射率測定値のヒストグラム
Fig.11 Histograms of reflectance values of regular reflection of flocked surface at wavelength of 2.5 μm (a) and 5.0 μm (b).

表1. 正反射率の平均値と標準偏差

Table1 Average value and standard deviations of reflectance values of regular reflection.

波長 (μm)	平均 値 (%)		標準偏差		黒色 塗料 塗布面
	FT-200	FT-300	FT-200	FT-300	
2.5	0.104	0.078	0.006	0.010	0.18
5.0	0.104	0.078	0.005	0.009	0.28
10.0	0.151	0.129	0.040	0.007	0.95

5. 植毛面の拡散反射率

5.1 測定方法

波長 $2.5\mu\text{m}$ ~ $10.0\mu\text{m}$ の赤外光に対する正反射率測定に引き続き、赤外光より波長の短い入射光に対する反射率を評価するため、紫外・可視・近赤外光に対する拡散反射率を測定した。測定には $0.19\mu\text{m}$ ~ $2.5\mu\text{m}$ の波長領域の測定が行なえる積分球を搭載した日本分光（株）製の「紫外・可視・近赤外分光光度計 V-570」を使用した。拡散反射率の測定では電気的ゼロ補正と光学的ゼロ補正の測定を行った後、供試料を積分球に取り付け拡散反射率の測定を行なった。

5.2 測定結果及び考察

図12は測定されたFT-300植毛面の拡散反射率スペクトルを黒色塗料塗付面のスペクトルと比較した結果である。これより、植毛面の反射率スペクトルは黒色塗料塗付面の17~25%であることがわかる。

図13はFT-200の拡散反射率スペクトルとFT-300の拡散反射率スペクトルの例である。正反射率スペクトルの場合と同様にFT-300の植毛面はFT-200の植毛面より低い反射率であることが確認できる。また、FT-200、FT-300いずれのパイルを用いた場合も短波長側ほど反射率が小さくなることが確認できる。反射率の値を評価するため、正反射率の場合と同様にFT-200、及びFT-300の植毛面50試料の拡散反射率スペクトルから、波長 $0.2\mu\text{m}$ （紫外領域）、 $0.5\mu\text{m}$ （可視領域）および $1.5\mu\text{m}$ （近赤外領域）における拡散反射率値を求め、ヒストグラムを作成した。図14にそのヒストグラムを示す。表2は図14のヒストグラムから算出した各波長における拡散反射率の平均値と標準偏差である。この表より、入射光の波長が短い領域ほど反射率が小さくなること、FT-300を使用した植毛面がFT-200を用いた植毛面に比べて約60%の反射率値であることが確かめられる。

表1の正反射率の値を表2の拡散反射率の値と比較すると、正反射率の値に比べて拡散反射率の値が大きいことがわかる。これは図8に示した正反射率測定装置を用いて反射率測定を行なう場合、植毛面で反射した光のうち鏡面反射した光のみが検出器で検出されるのに対し、積分球を搭載した紫外・可視・近赤外分光光度計では乱反射光を含む全ての反射光が検出器で捉えられるので、正反射率の測定値

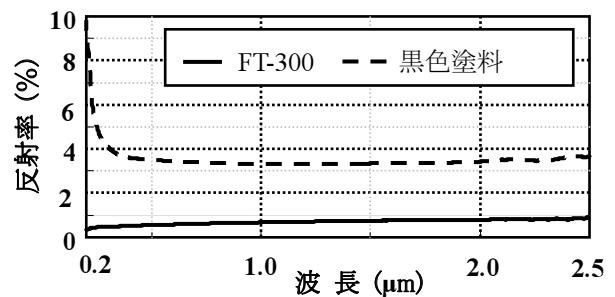


図12. 黒色塗料塗付面とFT-300植毛面の拡散反射率スペクトルの比較

Fig.12 Reflectance spectrum of diffused reflection of black paint coated surface and flocked surface with FT-300 piles.

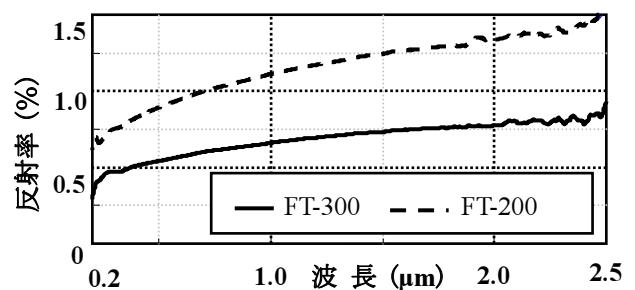
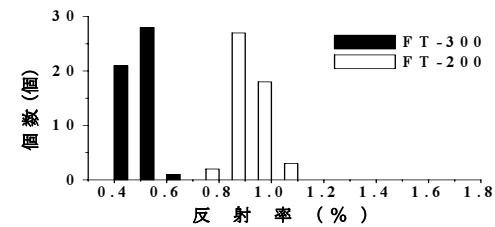
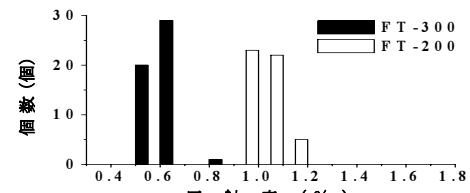


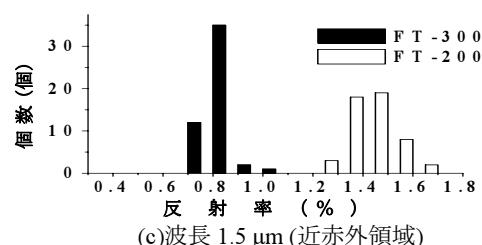
図13. FT-200およびFT-300植毛面の拡散反射率スペクトル
Fig.13 Reflectance spectra of diffused reflections of flocked surfaces of FT-200 and FT-300 carbon fiber piles.



(a)波長 $0.2\mu\text{m}$ (紫外領域)



(b)波長 $0.5\mu\text{m}$ (可視領域)



(c)波長 $1.5\mu\text{m}$ (近赤外領域)

図14. 拡散反射率測定値のヒストグラム

Fig.14 Histograms of reflectance values of diffused reflections of flocked surface for the wavelengths of $0.2\mu\text{m}$ (a), $0.5\mu\text{m}$ (b) and $1.5\mu\text{m}$ (c).

表2. 拡散反射率の平均値と標準偏差

Table 2 Average values and standard deviations of reflectance values of diffused reflections.

波長(μm)	平均値(%)		標準偏差		黒色塗料塗布面
	FT-200	FT-300	FT-200	FT-300	
0.2	0.90	0.51	0.059	0.058	10.76
0.5	1.01	0.61	0.060	0.048	3.53
1.5	1.42	0.84	0.084	0.056	3.32

が拡散反射率の測定値に比べ見かけ上低い値に測定されると考えられる。

6. 反射率測定結果に対する考察

カーボンファイバーパイル FT-200 と FT-300 を用いた植毛面の正反射率と拡散反射率を測定したが、表1、表2に示したように、赤外光に対する正反射率、紫外・可視・近赤外光に対する拡散反射率のいずれも FT-300 植毛面の反射率が FT-200 植毛面の反射率より低い値であった。反射率に影響する要因として、(1)パイルの長さと、(2)植毛密度が考えられるので、ここでは、これらについて考察した。

カーボンファイバーパイル植毛面の反射率は植毛されたパイルの光トラップ効果に起因すると考えられるので、パイル長は反射率に影響する大きな要因のひとつと考えられる。そこで、筆者らは FT-200 パイルと FT-300 パイルの SEM 像をもとに、パイル長の測定が可能な 40 本の FT-200 と FT-300 のパイル SEM 像をそれぞれ任意に選び、パイル長を測定しその分布を調べた。図15 がそれぞれのパイル長分布を示すヒストグラムである。このヒストグラムをもとに、それぞれのパイル長の平均値を算出した結果 FT-200 のパイル長の平均値は 140 μm、FT-300 のパイル長の平均値は 350 μm と算定され、FT-300 のパイル長は FT-200 に比べ、平均値で 2.5 倍長いことが確かめられた。この長いパイル長により FT-300 の植毛面は FT-200 の植毛面に比べより大きな光トラップ効果を生じ、これが低い反射率を生んだものと推測される。

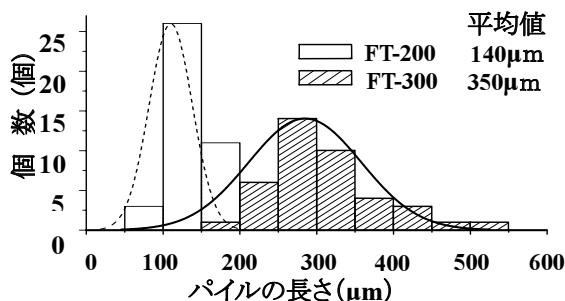


図15. カーボンファイバーパイルの長さのヒストグラム
Fig.15 Histograms showing carbon fiber piles lengths.

一方、パイル長と併せて、光トラップ効果に影響する要因として考えられるのが植毛面のパイル植毛密度（単位面積当たりに植毛されたパイル本数）である。そこで、実測データをもとに FT-200 植毛面と FT-300 植毛面の植毛密度を試算し、比較してみた。

図16 は基板上に塗付された接着剤量と基板の単位面積あたりに植毛されたパイル量の関係を示したものである。パイルの比重（密度）を ρ 、パイルの直径を D 、長さを L とすると、パイルの 1 本の重量 W は次の（1）式で与えられ、

$$W = (\pi D^2/4) \times L \times \rho \quad (1)$$

となる。植毛されたパイルの単位面積あたりの重量を A とすれば、植毛密度 N は次の（2）式により算出される。

$$N = A/W \quad (2)$$

図16 中にプロットされている各点の A の値（実測値）と D 、 L 、 ρ をもとに算出された FT-200 と FT-300 の W の値を用いて図16 中にプロットされた各点の N の値を算出し、描いた図が図17 である。ここで、 W の算出に際し、 L の値としては図15 に示した FT-200 と FT-300 のパイル長分布の平均値を用いた。図17 によれば、FT-200 の植毛密度が $5.51 \times 10^5 \sim 8.93 \times 10^5$ (平均値 : 7.21×10^5) (本/cm²) であるのに対し、FT-300 の植毛密度は $1.33 \times 10^5 \sim 2.22 \times 10^5$ (平均

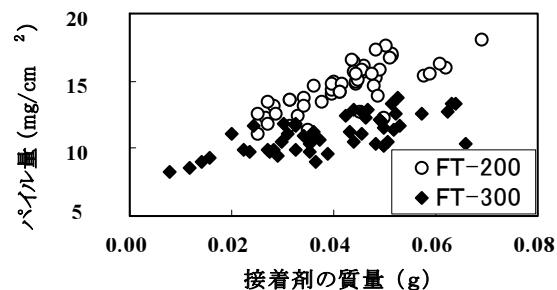


図16. 植毛面の単位面積あたりに植毛されたパイル量

Fig.16 Amount of flocked carbon fiber piles on the substrate.

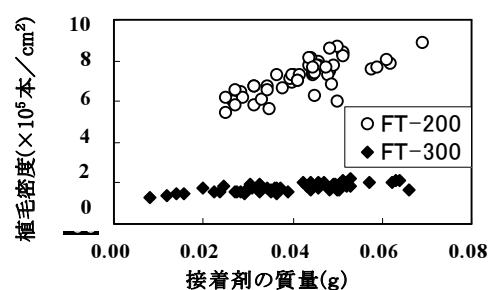


図17. FT-200 植毛面と FT-300 植毛面のパイル植毛密度

Fig.17 Pile density of flocked surface of carbon fibers: FT-200 and FT-300.

値： 1.78×10^5 (本/cm²) であり、FT-200 の植毛密度の平均値はFT-300 の植毛密度のほぼ4倍であることが確かめられる。

反射率測定において植毛密度が高い FT-200 の光反射率が FT-300 に比べて大きい結果が得られたが、これは、FT-300 およびFT-200 の植毛密度が 10^5 本/cm² の位の非常に大きな値で、反射率に影響を及ぼす範囲をはるかに超えており、反射率に差を生じた要因ではなく FT-200 と FT-300 のパイル長の差に基づく光トラップ効果の差が反射率に差をもたらしたと推察される。

7. 結 言

光の波長が 2.5～10.0 μm の赤外光に対するカーボンファイバーパイル植毛面の正反射率と 0.2～1.5 μm の紫外・可視・近赤外光に対する拡散反射率の測定結果について述べた。今回の結果の要点を示せば次の通りである。

- (1) カーボンファイバーパイル植毛面は紫外光から赤外光に至る広範な波長領域の入射光に対し、反射率 1 % 以下の光反射率を示すことが確認された。
- (2) カーボンファイバーパイル植毛面の光反射率は使用するカーボンファイバーのパイル長さにより異なり、パイル長の長いカーボンファイバーを用いた植毛面が赤外光に対する正反射率、および紫外・可視・近赤外光に対する拡散反射率とも低い値を示すことが確かめられた。

なお、今回筆者らが得た実験結果は、パイル長の異なる 2 種類のカーボンファイバーパイル FT-200 と FT-300 の植毛面を対象としたものであり、パイル長や植毛密度をさら

に変化させた場合、異なる結果が得られることも考えられるので、この点についての今後の検討が必要と考えている。

本研究は科学研究費補助金（萌芽研究；課題番号：16656099）の助成を受けて行なわれたことを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本熱物性学会編、熱物性ハンドブック、8.5 宇宙機、pp. 322、養賢堂 (1997)
- 2) 寺島俊介、井坂 勉、關井康雄、林 友直：「静電植毛による低反射率面の形成」、2002 年度静電気学会講演論文集、pp.159 - 160 (2002)
- 3) 井坂勉、長谷川晶一、關井康雄、林友直：「静電植毛による低反射率面の形成」、2004 度静電気学会春期講演会論文集、pp.1-2 (2004)
- 4) 庄司正弘：「伝熱工学」、東京大学出版会(1995)
- 5) A. Kato, A. Ohnishi and T. Hayashi: *Proc. of the 4th European Symposium on Space Environmental and Control System*, pp. 565 (1991)
- 6) 静電気学会誌 特集 「静電植毛」、Vol.18 No.3 (1992)
- 7) 藤本哲也、伊藤晴雄、林友直、生田信皓：「電子の低反射率面の形成と反射率測定」、電気学会論文誌 A, **115-A** (1995) 1072