技術解説

2. マルチ フィラメント分繊操作中の 静電気

静電気力が直接問題になる現象として筆者は最近、つぎのようなことを扱った。マルチ フィラメント の分繊機において、マルチ糸が分繊点に達するまでには、ガイドなどとの摩擦で必然的に帯電する。このときの静電反

分繊における静電気 および単繊維の強電 場内での挙動*

金 員 若 山 一 夫**

1. ま え が き

従来の方式をはなれた別の着想によって紡績を行なう試みでは、流体利用のつぎに静電気利用を考えることが多い。この場合、主題の内容としては帯電した繊維間、または極板上の間に働く静電気力が問題になる。そしてその基礎として繊維の帯電性能と、帯電繊維の強電界中での挙動が明らかでなければならない。

いろいろな対象について自然現象としての帯電については、その成因はもちろん、種々な分野での実際的な問題をも解決するため活発な研究が最近進められている。これに対して強電界中での挙動については、まだ知見が少ない。しかし、静電ブロック加工や電気集塵に関する成果は、われわれにとって貴重な研究指針である。これらについては、われわれの問題に関してもこの程度の研究進展を早く、との刺激を強く感じさせるものがある。

以下本文は系統だった論述ではない。前半で筆者の経験した繊維の帯電を問題にしなが¹⁾ら静電現象のつかみ方、静電磁気学の法則のあてはめ方などを参考に供し、つぎに Liddy, Downes 共著の論文を紹介する。この原著はもっぱら羊毛に限っての考察ではあるが、表題の問題についての数少ない基礎的研究である。

* Static Electricity When Spreading Multi-Filament, and Behavior of Wool Fibres in Electric Fields.

** K. Wakayama, Member. 京都工芸繊維大学繊維学部

(第1図) マルチ フィラメント の分繊機

発力が分繊力としてどれほど寄与するかが問題であった。まず、帯電量の測定が必要であって、第1図に示す構成の現場機械について、つぎのような測定結果を得た。

試料; ポリアミド 200 d/10 f (無撚)

糸速; 500 m/min

(1) A部帯電線密度

-12.5 esu/m

(2) C部分繊維糸帯電の合計 -21 esu/m

(3) D部ガイド (金属) 10個を銅線で連結してアースから絶縁し、 $10^{10}\Omega$ を通して流れる集電電流 (ガイドを通過するフィラメント 1 m 当たりからの電荷、以下同じ)

(イ) +1.1 esu/m (ロ) -1.0 esu/m (A部を水でぬらしてアースする)

(4) Bガイドをアースから絶縁し、 $10^8\Omega$ を通して電流測定

(イ) +4.3 esu/m (ロ) +4.3 esu/m (A部水)

上の (3), (4) ではそれぞれ記述した以外の部分は第1図のままである。この測定は計器 1 個による現場測

定であるから、種々の支障があって十分なものとは言えない。しかし、これらのデータをもとにただけでも、電荷の加法性を手がかりに各部での発電、アースへの漏洩などを解析することができ、将来、諸工程上での発電について³⁾詳細な研究を進めるときの問題の存在個所をよく示した。

3. 静電気反発力の推算

静電気力を問題にする場合、クーロン則がそのままの形で用いられる場合はごく少なく、電界から電荷が受ける力として計算される。しかし、誘電体としての繊維の帯電による電界は、ほとんど計算不可能（その事情は後述）に類するものであるから、大きな仮定を設けて表題どおり推算とする。

マルチ糸を、それへの帯電が表面に一樣分布する太さ $D(\text{cm})$ の円形導体棒（無限長）と見る。そして母線に沿った $1/10$ の表面積部分の電荷が他の部分の電荷から反発される力を、1本のフィラメントが他から押し出される力（静電分織力）と考える。

“ σ (esu/cm²) の帯電面密度を示す導体表面では、その部分の電荷 $\sigma \cdot ds$ (ds ; 微小面積 cm²) が

$$2\pi\sigma^2 \cdot ds \text{ (dyn)} \dots\dots\dots (1)$$

の放電張力を受ける。”

ここで棒の帯電線密度 q (esu/cm) と σ との関係として $\pi D\sigma = q$ 、および $ds = \pi D/10$ を代入すると、繊維軸に沿った 1 cm 当たりの上記の力は $q^2/5D$ (dyn/cm) である。いま、前節で得た最大帯電値 $q = 0.21$ esu/cm をとり、 $D = 0.015$ cm にすると 0.6 mg/cm が得られる。

誘電体の表面に電荷が一樣分布するとき、この値以下になるから、最大値を見積っての上の値を静電分織力と見なして考察をすすめる。

さて一方、マルチフィラメントの一端を指でしごいて、見事な分織状態を現わすことはしばしば知見することである。こうした現象から繊維の帯電について大きな効果が期待

(第2図) マルチフィラメントの一端を指でしごいて得られる分織状態

されがちであるが、その間に働く静電気力が上記程度であることは意外にも感じられる。

しかし、フィラメントの線密度がいまの試料で 0.022 mg/cm であり、また別に試みた種々の摩擦で得られた最大の帯電が 1 esu/cm 、したがって上の計算法による静電反発力が 15 mg/cm （先の例の約5²倍）になることなどを考えると、第2図の状態が得られることは十分考えられることである。

4. マルチフィラメントの分織に必要な力

第2図のような現象から、ただちに連続走行糸の静電分織を考えるのが第2節のはじめに述べた問題である。ここで実際にマルチ糸を分織するのに必要な力を求め、前節で得た推算値と比較しなければならない。筆者は前者の力の大きさをうかがう一つの目安になる実験を試みた。

マルチフィラメントの先端で少し分離したフィラメントの1本に分銅を取り付け、この分銅を鉛直に落下させる（第3図）。このとき分銅（質量 m_i ）の重力に逆らう力（ F_i ）があれば、静止から定区間（ S ; 約2 m）を落下する時間（ t_i ）は自由落下の時間（ t_0 ）とは異なる。

そこで分銅の自由落下および、つぎの3種の測定を行なうて、

- (1) 試料のマルチフィラメントからの分織落下
- (2) 摩擦帯電させたマルチ糸からの分織落下（この場合の帯電は第2節の例 0.2 esu/cm の程度にした）
- (3) すでに分織されたフィラメント1本をつかんで落下

$$F_i = m_i \cdot g \left\{ 1 - \left(\frac{t_0}{t_i} \right)^2 \right\}, [i = 1 \sim 3] \dots (2)$$

を計算した（第1表）。

(1), (2) 測定の場合、分銅が宙づりになって定区間の落下が実現しないことが多く、落下時間の記録が得られたのは4回試行のうち1回程度であった。したがって、仮定した一定値 F_1, F_2 （もちろん、測定値は大きい分散を示す）の意味は漠然とした内容のものではある

(第3図) 分銅の落下による分織

(第1表) 分銅落下による分織

項 目	1	2	3	
$m(g)$	0.3	0.21	0.21	$F_1 - F_3 \div 20 \text{ mg}$
$t(\text{msec})$	663.4	684.2	643.8	$F_2 - F_3 \div 23 \text{ mg}$
平均値)				
$F(\text{mg})$	25.8	29.5	6.2	

($t_0 = 634.3 \text{ msec.}$)

が、一つの目安として設定できるものとする。 F_3 はもちろん平均的な空気抵抗で F_1, F_2 の中にも含まれている。

以上の考えから $F_1 - F_3, F_2 - F_3$ がそれぞれ生の、また帯電した試料から、フィラメント1本を分織するのに必要な分織力の表現である。表に示した測定値の限りでは、帯電による反発力が分織力のラムダム性のうちにまったく埋没している。そして、この分織力の値から判断して、前節末に述べたような最大帯電の場合に、はじめて静電分織力が問題になるように思われる。さらにまた、これらのことは前節の推算がそう的をはずれたものでないことをも示している。

5. 繊維の帯電について

われわれの取り扱う種々の繊維を電気の絶縁体としての面から考えるのは、その誘電体としての性質を直接問題にする場合、あるいは静電気障害を考えるとときなどに限られるようである。

事実、村崎は静電気除去の問題で、正負の帯電を合計してみかけ上ゼロ帯電であるのと、完全に中和した状態とを区別する必要があることを強調している。これは静電気測定の問題とも関連していることで、絶縁体として繊維上の帯電が、個々に分離した点状帯電の集まりであることからきている。

本特集のような静電気応用を考える立場では、繊維が上記した性質のものとして限定された場合、取り扱いが非常に困難になる。静電フロック加工において繊維の誘電率は、電界に対して繊維軸を平行化するのには有効であるが、原則として一様電界においては繊維を飛昇させる力にあずからない。誘電処理と称してフロック加工を有効にするための前処理も、繊維に電導性を与えて電荷を極板から誘導する意味のほうが主体のように思われる。⁵⁾ 向井は処理によって漏洩抵抗を $10^9 \Omega$ 以下に下げ、同時に繊維間の分離性もそこなわないような柔軟剤が望ましいとしている。

このように静電気応用の立場では繊維に電気伝導性を考え、これに荷電する（伝導の本質は別として）とともに

に、導体としての電気容量の増大をはかる。後に引用する Liddy らの研究では 20μ 径、長さ 15 cm の羊毛を 100% 関係湿度中において、つぎの理由からこれを導体としての取り扱いに終始している。

かれらは上記試料が抵抗 $10^{10} \Omega$ 、容量 10^{-12} F 程度として充放電の時定数が 10^{-2} sec になるから、ふつうの静電現象ではこれを導体として取り扱えるという。また、この時定数に対応するオーダーの周期現象も見ている。さらに先の向井の研究でフロックの長さが羊毛の $1/50$ 程度であることを考えると、かれもフロックの充電時定数が同程度のものでなければならないことを主張していると解される。筆者の第3節の推算もマルチ糸を静電的に導体と見なしての所論であった。

ここに実際の場合で問題になるのは、誘電体としての分極による効果と、実電荷の静電気力による効果とが混在することである。ほとんどの静電現象には不均一電界が現われて、微小誘電体が電界勾配のはげしい（力線の集中する）部分へ移動させられる。

この現象と静電気力による吸引、反発とを明確に区別しない限り繊維を電導体と見、また絶縁体として取り扱う仕方が、都合に応じたかなり勝手な使い分けのように見えることがある。したがって、問題を反発現象に置き換えたり、現象の時間関係を時定数と比較してみる検討がまず最初に必要である。

6. 羊毛の帯電性

Liddy らは先に述べた条件で羊毛の帯電について貴重な実験を行なった。 10 cm 径（2 b）のアースされた円筒電極の中心軸に沿い、2本の繊維を 2 mm 間隔でつるして高電圧をかけた。そして2本の繊維間の静電反発距離から帯電の表面密度 $\sigma (\text{esu/cm}^2)$ を知り、これと加えた電圧 $V (\text{kV})$ との間で第4図に示すような飽和曲線を得た。

図は、はじめ直線的な増加であるが、かなり急な曲がりて飽和しており、これが放電によって生じることが顕微鏡観察で、繊維表面に放電斑点が見られることから確かめた。また、この放電の跡が $2 \sim 3 \text{ kV}$ から現われることも、Townsend の式を用いて裏付けた。

“大気の圧力 p (気圧) で、半径 a (cm) の正帯電針金がコロナ放電を開始する電界強度 $E_d (\text{kV/cm})$ は

$$E_d = p \left(30 + \frac{9}{\sqrt{a \cdot p}} \right) \dots\dots\dots (3)''$$

一方、針金表面の電界強度 E は次式である。

(第4図) 羊毛の帯電密度 σ と電圧 V との関係
(負帯電, 関係湿度 100% の大気中)

1. 直径 19.6 μ
2. " 39 μ
3. " 50.4 μ

$$E = 4\pi\sigma \quad \dots\dots\dots (4)$$

$E = E_d$ として得られる関係は細い繊維ほど σ の大きい第4図の曲線 1, 2, 3 のちがい模様を説明する。

さて、半径 a の円筒導体棒と考えた繊維 1 本の帯電線密度 q が、上記した円筒アース電極との間で、同心円筒電極間の 1 cm 当たりの容量 $C = 1/2 \log b/a$ の関係で蓄電されるものとする、加えた電圧 V に対して

$$q = 2\pi a \sigma = V \cdot C \quad \left\{ C = \frac{1}{2 \log b/a} \right\} \quad \dots (5)$$

これを (4) 式に代入して放電開始時の電極間電圧を V_d (kV) とすると

$$E_d = V_d \frac{1}{a \log b/a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$a = 0.001$ cm, $b = 5$ cm, $p = 1$ 気圧を (3), (6) 式に代入して得られる $V_d = 2.7$ kV ($E_d = 320$ kV/cm) は, Liddy などの先の知見と一致する。

(6) 式はまたつぎの解釈ができる。 E_d の式 (3) で見るかぎり小半径ほど放電電界強度は大きくなる。しかし、そのための帯電面密度(力線の集中度)の増大のほうがはなはだしく((5)式), かえて加える電圧は小さくてすむ。このことは“導体表面の曲率半径が小さいほど放電電圧(極板間の)が低い”というよく知れた事実であるが、上の例では電界強度と電極間にかかる電圧とが大小逆の関係になっている。一様でない電界に関しては、こうしたことが知見の伝達の場合に混乱のもとになることが多い。

第4図では繊維径による上記放電電圧(V_d)の変化を明確には示していない。図に見られる飽和電圧 V_s は V_d とはちがったものである。図の横軸 V は試料の上部尖端に加えられた電圧の値で、繊維の高抵抗のため全体が同時に放電開始するわけではない。試料の下方の部分の放電電圧は、 V に対して高抵抗を直列につなかれた放電管のそれと類似の動作をする。

Liddy らの実験で高電圧を加えての帯電が約 50 esu/cm² のオーダーであるのに対し、第3節で述べた摩擦での最大帯電が 20 esu/cm² ぐらいであることは、繊維の帯電性について種々の問題を感じさせる。これに関連するかれらの他の実験については原論文を参照されたい。

7. 帯電した繊維の強電界中での挙動

(本節では Liddy らの原著をただ抄録する)

径 20~24 μ 、長さ 10 cm のメリノ羊毛を、関係湿度(RH)の変えられる箱の中(ことわりのないとき 100% RH)に設けた平行電極板の間で、その挙動を観察した。

7.1 一様電界中で一端を極板に固定した試料

電界強度(E) 50 V/cm で、ところどころ曲率半径 1 cm ほどの曲がりを持ちながら(クリンプはそのままの状態)電界の方向に立ち上がる。 $E = 500$ V/cm でこの大きな曲がりはなく、繊維の尖端で引っ張られたようにまっすぐになる。この力は 20 mg と測定されたが、これが尖端の蓄積電荷に電界が作用しての力であるとしても、尖端での電界は一様でないから、この電荷を正確には計算できない。しかし、このとき放電しているから、その電界を 100 kV/cm とすると電荷は 10^{-1} esu オーダーになる。

$E = 500$ V/cm 以上になると繊維が縦振動をはじめる。これはクリンプの遅い伸張、急な縮みのほぼ 20 c/s 弛緩振動で、ストロボ光で見られるほど規則正しい。この挙動は $E = 1$ kV/cm までは、その振動数と振幅を増す、それ以上ではつぎの3種の挙動が現われる。

(第5図) Genuflexion Oscillation (挫屈運動) とその説明

- (1) 振幅大になるが、不規則になり、3 kV/cm 以上で先端がいわゆるはためく
- (2) 後に説明する挫屈振動を行なう
- (3) 振動が止まって直立する

(2) は第5図aに示す $A \rightarrow B \rightarrow C$ の姿勢変動で、電界が増すと $B \rightarrow C$ を繰り返す($C \rightarrow B$ 回復の早い)一種の弛緩振動である(1~10 c/s, RH 減じると周期長くなる)。これは第5図bに示すように繊維の中に縦方向電界(繊維が完全導体でないため存在する)があるため、解離イオンが分離されて放電を維持する電流を生じ、極板に向かうイオンは固定端近くで局部電界をつくる。この局部電界が左右でつり合わなければ繊維が膝を屈する運動を起こす。8 kV/cm にもなると(1)、(2)の運動はすべて停止して直立する。

7.2 両端自由な試料

電荷の集中が繊維の両先端に現われて繊維軸を電界方向に向け、その実電荷(正負電荷の代数和)は直前に接触した電極に対する反発力の原因になる。そのため試料は実電荷を交換しながら極板の間で周期的に往復する。100% RH, 1 kV/cm の電界中で 50 cm/sec の速度にもなる。こうして極板への衝突を重ねる結果、単繊維が丸くもつれ込んだ形になることもある。

ある場合には繊維が極板と実際の接触をせず、放電によって実電荷を交換しながら上記の運動をする。また、中には一方の極近くで動的安定状態をとるものもある。これは極板近く数 cm の所で行なう 30 c/s, 振幅 3 mm

(第6図) 電極付近での動的安定振動

くらいの電界方向の振動で、その原因の推定は第6図のように示された。

この種の挙動は針端電極で得られるような不均一電界でふつうに見られる。これは電界勾配のはげしい所に繊維が安定振動の場を求めることを意味しており、多くの繊維が存在するとき、それらがこうした部分に集まることになる。ここに繊維間で異極性尖端相互のからみ合いが生じ、電極間橋絡が起こる。この現象はむしろ交番電界で特長的である。

7.3 交番電界における挙動

50 c/s 交流電界に一端固定の羊毛が置かれると、電界方向に沿って規則正しい 100 c/s の伸縮振動を起こす。RH が下がると急に振幅が減少して、80% RH 以下ではまったく 50 c/s に応答しない。

自由な試料の場合は電界中の、ある予測できない場所が安定位置になり(この場所が不規則に変化する)、繊維全体としての移動のない 100 c/s 伸縮振動を行なう。こうした安定位置の任意的、随時的な選択は、繊維中の実電荷が電界の交番を契機として移動するためであると考えられた。

交番電界における橋絡現象の1例として尖頭値 1 kV/cm の場合、25 cm の電極間でできた橋絡の平均断面が約 20 本の繊維からなっていたことを示している。

文 献

- 1) 高分子学会編; 静電気ハンドブック, 地人書館, 昭 42
特集“静電気と高分子”高分子, 16, No. 179(1967)
L.B. Loeb; Static Electrification, Springer-Verlag, Berlin, 1958
Inst. of Physics; Static Electrification, Brit. J. Appl. Phys., Suppl., No. 2, 1953
- 2) D. T. Liddy and J. G. Downes; Behaviour of Wool Fibres in Electric Fields, J. Text. Inst., 49, T469~477 (1958)
- 3) 解析の一部は講演前刷で示したが、別に発表の機会を得る。
- 4) 村崎; 高圧放電を利用した除電装置の取り扱いについて, 繊維誌, 13, 492 (1960-7)
- 5) 向井; 静電植毛における電界内の短繊維の飛昇について, 繊維誌, 15, 803 (1962-昭 37)