流体中の線状体の運動について

(第1報) 平行流れ中の運動

京都工芸繊維大学 工芸学部	塩 見	昭** (会員)
〃	木 瀬	洋** (〃)
〃	宇 野	稔** (〃)

Motions of Slender Bodies in Fluid Flow.

Part 1 : Motion in Parallel Flow.

Akira Shiomi, Hiroshi Kise and Minoru Uno.

Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo ku, Kyoto.

Abstract

Motions of slender bodies of lightweight, such as single fibers or their small bundles, transported by straight and parallel fluid flows, were explored analytically and experimentally.

First, an approximate analysis was developed for the motion of a slender body in two dimensional parallel flows based on fluid dynamic forces acting on it. The equations of motion, thus obtained for translational and rotational motions, gave the numerically calculated results for estimating effects of various factors in respect to air flows and bodies.

Experiments on the motion of fibers conveyed in a straight duct with air and water flows were performed using photodetectors and multiflash photography.

Calculated values agreed well qualitatively with experimental results. It is verified that this approximate analysis is applicable to estimate the motion of fibers in straight and parallel fluid flows. (Received December 15, 1981)

摘 要

目的 単一の短繊維あるいはその微小な集束の流体輸送に関連して、平行な流れ中における線状態の軌道や姿勢などの挙動を解析的および実験的に明らかにする。

成果 (1)真直な二次元平行流れ中における線状体の並進運動、および線状体重心を通り線状体軸に垂直な軸のまわりの自転運動に関する運動方程式を線状体の働く流体力学的な力に基づいて導いた。(2)数値計算により、流体の速度分布、線状体の直径、比重、初期傾き角、初期位置などが線状体の挙動に及ぼす影響を検討した。(3)光検出器やマルチ ストロボ写真撮影法を用いて、真直な管路中を流体によって運ばれる線状体の挙動を測定、観察し、数値計算の結果と比較した。この結果、計算値は実験値と定性的にかなり一致し、導いた運動方程式によって、真直で平行な流れの中の繊維の運動を推定できることがわかった。

(昭和56年12月15日受理)

1. 緒 言

単一の短繊維あるいは短繊維から成る微小な繊維束の空気輸送は、不織布製造におけるランダム ウェブの形成や、オープン エンド紡績などに用いられる。このように短繊維が流体によって輸送される際の速度や姿勢などの挙動は、輸送管路の設計、繊維配列、ひいては製品品質に大きい影響を及ぼす重要な因子であるにかかわらず、これに関する研究はきわめて少ない。

繊維のように細くて軽い線状体の運動している流体中

での挙動を理論的に取扱った研究には Feldman¹⁾の研究があり、繊維を軽い粒子と考えて、渦流やバンド、分岐管中の流れなど一様でない空気流中での粒子軌跡を求めている。また、管路中を気流によって輸送される繊維の運動を取扱ったものには、オープン エンド精紡機のコーミング ローラとロータ間の短いダクト中を飛走する繊維の運動を単純化して表した Ripka²⁾の研究がある。しかし、これも簡単な運動方程式と繊維運動の傾向を示すにとどまっている。さらに、縮小管を使用して繊維の平行化をはかった Edberg³⁾の実験的研究や、低速気流中

での繊維の姿勢を写真撮影から求めようとした池田ら⁴⁾の研究、管路内を飛走する繊維の写真撮影法に関する Lange ら⁵⁾の研究などが見られるが、いずれも現象論にとどまっており、深くは解析されていない。

なお、静止流体中での線状体の運動に関しては堀川ら^{6,7)}の研究があり、静止流体中を落下する線状体の運動を、非粘性流体中での物体の運動に関する Lamb の理論に基づいて解析している。また、密度がかなり大きく、また比較的直径の大きいモデル線状体について水中での落下実験を行って検討している。

本報では、平行流れによって比較的短い距離を運ばれる短くて細い単一線状体の挙動を明らかにするため、二次元平行流れ中の細くてアスペクト比のきわめて大きいモデル線状体について、その各部に作用する流体の速度成分を考え、線状体の並進運動および線状体軸に垂直な軸のまわりの自転運動を理論的に考察した。また、真直な管路内の流体によって運動する線状体の挙動を、光検出器およびマルチ ストロボ写真撮影によって測定、観察するとともに、数値計算の結果と比較、検討した。

2. 記号と仮定

2.1 記号

本報で使用する記号を、つぎのように定める。

C_d , C_f : 線状体の抗力係数と摩擦抵抗係数

D : 線状体の軸に垂直に作用する全抗力

D_x , D_y : 線状体に作用する x 方向と y 方向の全抗力

d : 線状体の直径

dD : 線状体軸上の微小長さ dl の部分において、線状体軸に垂直に働く抗力

dF : dl の部分において線状体軸に平行に働く摩擦抵抗抗力

dl : 線状体軸上の微小長さ

dM : dD によって、線状体重心を通り線状体軸に垂直な軸のまわりに生じる回転モーメント

F : 線状体軸に平行に線状体全体に作用する全摩擦抵抗抗力

I : 円柱状線状体の重心を通り線状体軸に垂直な軸のまわりの慣性モーメント

L : 線状体の全長

l : 線状体の重心 G から線状体軸に沿ってとった長さ

M : 線状体の全回転モーメント

m : 線状体の質量

$2R$: 管路幅

R_{ev} , R_{ep} : 線状体軸に垂直および平行な速度成分に基づくレイノルズ数

s : 線状体の比重

V : 流体の速度

V_C : 線状体重心 G から線状体軸に沿って l なる距離にある点 C での流体速度

V_G : 線状体重心 G の並進速度

V_v , V_p : dl の部分において、線状体軸に垂直な方向および平行な方向の流体の相対速度

x , y : 線状体重心 G の x 座標と y 座標

$\dot{x}$, $\ddot{x}$: 線状体重心 G の x 方向の速度と加速度

$\dot{y}$, $\ddot{y}$: 線状体重心 G の y 方向の速度と加速度

α : V_G が線状体軸と成す角

ρ : 流体の密度

ϕ : 線状体の傾き角 (線状体軸と x 軸との成す角)

$\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$: 線状体の重心を通り、線状体軸に垂直な軸のまわりの線状体の自転速度と自転加速度

2.2 仮定

平行流れ中での線状体の運動を理論的に考察するため、水平で真直な流体の流れを考えると同時に、つぎのような仮定を設ける。

(i) 流体は非圧縮性である。

(ii) 流体の流れは二次元平行流れとし、その速度は流れ方向では変化しない。

(iii) 流れは物体の運動によって乱されない。

(iv) 線状体は太さの均一な細い円柱状で、真直な剛体であり、アスペクト比はきわめて大きくて、末端効果は無視できる。

(v) 線状体は常に二次元流れの面内で運動する。

(vi) 線状体の軸方向の微小長さ dl の部分において、線状体軸に垂直に働く抗力 dD は次式で与えられる。

$$dD = C_d \cdot \rho \cdot d \cdot V_v^2 \cdot dl/2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(vii) 同じく dl の部分において、線状体軸に平行に働く摩擦抵抗抗力 dF は次式で与えられる。

$$dF = C_f \cdot \rho \cdot \pi \cdot d \cdot V_p^2 \cdot dl/2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(viii) 線状体には流体抵抗のみが作用し、重力、浮力などの物体力は働かない。

(ix) 線状体は、その軸のまわりには回転しない。

3. 運動方程式

3.1 並進運動

二次元平行流れ中での線状体の運動を、線状体はその姿勢を変えることなく流体によって運ばれる並進運動と、線状体はその重心を通り線状体軸に垂直な軸のまわりに回転して刻々に姿勢を変える自転運動 (以下では単に自転運動と呼ぶ) とに分けて考える。

図1 線状体に作用する速度成分と記号

まず、並進運動を考えるため、図1のように流れの方向にy軸、それと直角な方向にx軸をとり、流れの中で線状体DEがx軸に対して角度 ϕ （反時計方向を正にとる）傾いた状態で運動を開始するとする。ここで、線状体重心Gから線状体軸に沿って l なる距離にある点Cにおける流体速度を V_c とし、線状体は流体中を速度 V_g で並進運動するとともに、 x - y 平面内で反時計まわりに自転運動をするとする。このとき、点Cにおいて線状体軸に垂直に働く流体の相対速度成分 V_v は式(3)で与えられる。

$$V_v = V_c \cos \phi - V_g \sin \alpha - l \dot{\phi} \quad \dots\dots\dots (3)$$

いま、C点において線状体軸に沿った微小長さ dl を考えると、この部分に働く抗力は式(1)で与えられる。よって、 V_v に応じたレイノルズ数 Re_v によって決まる抗力係数 C_d を用いれば、線状体に作用する全抗力 D は、

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot d \int_{-L/2}^{L/2} C_d \cdot V_v^2 \cdot dl \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、 dl なる部分において、線状体軸に平行な流体の相対速度成分 V_p は式(5)で与えられる。

$$V_p = V_c \sin \phi - V_g \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (5)$$

dl の部分に働く摩擦抵抗抗力 dF は式(2)で与えられるから、 V_p に応じたレイノルズ数 Re_p によってきまる摩擦抵抗係数 C_f を用いれば、線状体全体に作用する全摩擦抵抗抗力 F は次式で表わされる。

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot d \int_{-L/2}^{L/2} C_f \cdot V_p^2 \cdot dl \quad \dots\dots\dots (6)$$

x 方向および y 方向の全抗力を、それぞれ D_x および D_y とすれば、

$$D_x = D \sin \phi + F \cos \phi \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$D_y = D \cos \phi + F \sin \phi \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって、線状体の並進運動に関する運動方程式は、式(9)、(10)で与えられる。

$$m\ddot{x} = D_x \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$m\ddot{y} = D_y \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.2 自転運動

前節では並進運動を考えるに当って、線状体とその重心Gを通して線状体軸に垂直な軸のまわりに回転する場合を考慮して運動方程式を導いた。このように、線状体運動が自転を伴うのは、線状体各部に作用する流体の速度が異なる場合である。この場合、線状体軸上の任意の点Cにおける微小長さ dl の部分に線状体軸に垂直に働く抗力 dD によって生じる重心Gのまわりの回転モーメント dM は、 dD に関する式(1)を代入することにより、次式で与えられる。

$$dM = l \cdot dD \\ = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot d \cdot V_v^2 \cdot dl \cdot l \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって、線状体の全回転モーメント M は、

$$M = \frac{1}{2} \rho \cdot d \int_{-L/2}^{L/2} C_d \cdot V_v^2 \cdot l \cdot dl \quad \dots\dots\dots (12)$$

そこで、線状体の重心まわりの慣性モーメントを I とすれば、線状体の重心まわりの自転に関する運動方程式として、式(13)が得られる。

$$I\ddot{\phi} = \frac{1}{2} \rho \cdot d \int_{-L/2}^{L/2} C_d \cdot V_v^2 \cdot l \cdot dl \quad \dots\dots\dots (13)$$

さらに、円柱状物体について、 $I = mL^2/12$ であるから、

$$\ddot{\phi} = 6\rho \cdot d \cdot \frac{1}{mL^2} \int_{-L/2}^{L/2} C_d \cdot V_v^2 \cdot l \cdot dl \quad \dots\dots\dots (14)$$

よって、式(9)、(10)および(14)を連立させて解くことにより、二次元平行流れによって輸送される線状体の運動を求めることができる。

4. 線状体運動の数値計算

4.1 計算条件

いま、流体の流れとして空気流を考え、そのなかでの線状体の運動について数値計算を行う。そこで、気流と線状体について、つぎのような条件を用いる。

(1)気流は真直な管路内の二次元平行気流とし、その速度についてつぎの2つの場合を考える。

(a)気流速度が一樣な場合、

(b)管路幅方向で速度分布がある場合。

(b)の場合の速度分布はKármán Prandtlの $\frac{1}{4}$ 乗則に従うとし、気流速度 V は幅 $2R$ の管路の管壁からの距離 x によって、次式のように変化する。

$$V = V_{max}(x/R)^{1/7} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 V_{max} は管路軸上の気流速度である。

(2)空気密度 $\rho = 0.119 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 (20^\circ\text{C}, 760 \text{ mmHg})$

とする。

(3)線状体の抗力係数 C_d および摩擦抵抗係数 C_f は、レイノルズ数に依存するから、それぞれつぎのようになる。

(a) C_d : 流れに対して垂直におかれた無限円柱の抗力係数⁸⁾を用い、線状体軸に垂直な方向の流体の速度成分 V_v に基づくレイノルズ数 Re_v に応じてつぎのように近似させる。

$$Re_v \leq 1 \text{ の場合 } C_d = (10.9 / Re_v) / (0.87 - \log Re_v)$$

$$1 < Re_v \leq 3 \times 10^2 \text{ の場合}$$

$$C_d = 10^{\left(\frac{3.418}{\log Re_v + 1.899} - 0.702 \right)}$$

$$3 \times 10^2 \leq Re_v \text{ の場合}$$

$$C_d = 1.2$$

(b) C_f : 図2中のポリエステル繊維についての実験値

図2 各種繊維の摩擦抵抗係数(付図3の(I))

に基づいて求めたつぎの実験式を用いる。

$$C_f = 0.7 \times Re_p^{-0.8}$$

ここで、 Re_p は線状体軸に平行な速度成分 V_p と代表寸法にとった繊維直径 d によって求めたレイノルズ数である。なお、図2は各種繊維についての摩擦抵抗係数の実測値から式(2)に基づいて C_f の値を求め、これらを Re_p に対してプロットしたものである(付録参照)。

4.2 計算方法

計算のフローチャートを図3に示す。計算の主要部を順を追って説明すればつぎのとおりである。

(i)時刻 $T=0$ において、線状体の性状に関する L, d, s , 気流中における線状体の位置や速度に関する初期値(添字 i を付す) $x_i, y_i, \phi_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{\phi}_i$ および気流に関する V_{max}, R などを与える。以下の説明では、一般化のため、任意時刻 T における計算手順を示す。

(ii)線状体の重心 G から線状体軸に沿って l なる距離にある点 C での気流速度 V_c を、 G の x 座標およびその時刻における線状体の傾き角 ϕ に基づいて計算する。こ

図3 計算のフローチャート

のとき、 l は x の増加方向を正にとる。

(iii)線状体重心 G の並進速度 V_G を $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ より求めるとともに、 V_G の方向と線状体軸との成す角を $\tan^{-1}(\dot{y}/\dot{x})$ と ϕ に基づいて求める。

(iv)傾き角 ϕ と重心まわりの線状体の自転速度 $\dot{\phi}$ を考慮して、 C 点において線状体軸に垂直な気流の相対速度 V_v を求める。このとき、 $\dot{\phi}$ は反時計方向を正にとる。

(v) V_v に応じたレイノルズ数 Re_v に基づいて C_d を求め、 C 点における $(C_d \cdot V_v^2 \cdot dl)$ および $(C_d \cdot V_v^2 \cdot dl \cdot l)$ の値を V_v の正負に応じて計算してそれぞれ $\Delta S_1, \Delta S_2$ とする。

(vi)一方、 C 点において、線状体軸に平行な気流の相対速度 V_p を V_v の場合に準じて求める。

(vii) V_p に応じたレイノルズ数 Re_p に基づいて C_f を求め、 C 点における $(C_f \cdot V_p^2 \cdot dl)$ を V_p の正負に応じて計算して、これを ΔS_3 とする。

(viii)以上の計算を線状体の全長にわたって行い、この結果得られた S_1, S_2, S_3 を運動方程式に代入することによって、 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\phi}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$ さらに x, y, ϕ を求める。

(ix)以下、時刻 T を順次 $\Delta T (=10^{-3}s)$ ずつ進めて上述の計算を続行し、線状体重心が所定の位置 ($y=100 \text{ cm}$) に達したとき、あるいは線状体の一端が管壁に接触したとき計算を打切る。

なお、以上の数値計算には、京都工芸繊維大学の FACOM 230-28 電子計算機を使用した。

4.3 計算結果

A. 一様速度の場合

図4は、 $R=10\text{ cm}$ の管路内において速度 $V=10\text{ m/s}$ で一様な平行気流中において、線状体を異なった初期傾

図4 一様速度の気流中における線状体の運動(計算による)
($V=10\text{ m/s}$, $L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.3$)

き角 ϕ_i で運動を開始させたときの計算結果を示す。図は管壁上に原点をとり、 y を たて軸にとって運動距離、 x を よこ軸にとって管壁からの距離として示し、 $x=10\text{ cm}(=R)$ には管路軸が示してある。

線状体は、 $L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.3$ とし、初期傾き角 ϕ_i は $0^\circ\sim 90^\circ$ の範囲で 15° ずつ変化させた。また、線状体はその重心 G が管路軸上にあつて、初速 $\dot{x}_i=\dot{y}_i=0$ で運動を開始するものとし、 $\dot{\phi}_i=0$ とした。図は計算結果に基づいて、 0.05 s ごとの線状体の位置と姿勢を示したものである。

図から明かなように、 $\phi_i=0^\circ$ の場合は、線状体は抗力のみにより管路軸上を $\phi=0^\circ$ のまま運動する。一方、 $\phi_i=90^\circ$ の場合は、線状体重心の位置を図中の管路軸上に・印で示したが、線状体は抗力に比してかなり小さい摩擦抵抗力のみの作用によりゆっくり加速され、 $\phi=90^\circ$ のまま管路軸上を運動する。しかし、 $\phi_i\neq 0^\circ$ および $\phi_i\neq 90^\circ$ の場合は、たとえ管路軸上で運動を開始しても、初期傾き角 ϕ_i に応じた抗力と摩擦抵抗力の合力によって線状体の軌道は管路軸から外れ、その後次第に流れ方向に軌道を変えながら運動する。このとき、初

期傾き角 ϕ_i の増加に伴って、 x の負の方向の抗力が支配的となり、その方向の変位は大きくなるが、図4(b)の $\phi_i=60^\circ$ および 75° の場合に見られるように、ある程度 ϕ_i が増加すると摩擦抵抗力の影響が大きくなり、 x の負の方向の変位は減少するとともに、 y 方向の速度も小さくなる。

このように、線状体の軌道は初期傾き角 ϕ_i によってかなり変化するが、気流速度が一樣であるため、線状体各部に作用する気流速度は同じであり、線状体はその軌道のいかにかわらず自転運動を伴わないで、単に並進運動を行う。

しかし、一般に線状体が一樣速度の気流中で運動することはまれであり、速度分布のある流れや複雑な流れ中での運動を考えるほうがより实际的であろう。また、線状体のような長さ/太さ比の大きい、すなわちアスペクト比の大きい物体の、このような一樣でない流れのなかでの挙動は、粉粒体のような物体のそれとは明らかに異なる。そこで、速度分布のある気流中での線状体の運動およびこれに関係する要因について調べる。

B. 速度分布のある場合

(i) 初期傾き角 ϕ_i の影響

図5は、 $V_{max}=10\text{ m/s}$ で、速度分布が式(15)に従う気流中において線状体が運動を開始した場合の計算結果を示す。ここでは比較のため一樣速度の場合と同一条件とした。

図5 速度分布のある気流中における線状体の運動
(計算による)
($V_{max}=10\text{ m/s}$, $L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$)
($s=1.3$, $x_i=10\text{ cm}$)

図に見られるように、 $\phi_i=0^\circ$ の場合は線状体は流れの対称性により一様速度の場合と同様に自転することなく管路軸上を運動するが、気流速度を $V_{max}=10\text{ m/s}$ としたため、その速度は当然小さくなっている。一方、 $\phi_i=90^\circ$ の場合は一様速度の場合とまったく同一状態で運動することはいうまでもない。

$\phi_i \neq 0^\circ$ および $\phi_i \neq 90^\circ$ のときは、線状体は x の負の方向に押流されて軌道は管路軸から外れ、これに伴って速度分布の影響を受けて反時計方向のモーメントを生じて自転し、線状体軸が流れに平行になるように姿勢を変えながら運動する。このため、 x の負の方向の抗力が次第に減少するので、 x の負の方向への変位および速度は、一様速度の場合に比していずれも小さい。

図6は運動中の線状体の姿勢を表わす傾き角 ϕ を y 方

図6 線状体の y 方向の運動距離と傾き角 ϕ の関係
(計算による)
(速度分布のある場合、 $V_{max}=10\text{ m/s}$)
($L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.3$)

向の運動距離との関係において示したものである。たて軸上の数値は初期傾き角 ϕ_i を示すが、 ϕ_i の増加に伴って 1 m を運動する間の総自転角 Φ は減少し、自転速度も小さくなることがわかる。なお、同図には次項で述べるように、線状体の初期位置を管路軸からはずして $x_i=7.5\text{ cm}$ とした場合についての姿勢の変化を破線で併記してある。この場合、初期位置が管路軸上である場合に比して、最初から速度分布の影響を受けるため、運動初期の自転速度が大きいことがわかる。

(ii) 初期位置の影響

線状体の運動に対する初期位置の影響を図7に示した。これは初期位置を管路軸からはずして $x_i=7.5\text{ cm}$ とし、 $\phi_i=0^\circ$, 15° および 30° に変化させた場合であって、すでに述べたように、線状体は最初から気流の速度分布の影響を受ける。このため、たとえ $\phi_i=0^\circ$ であっても自転し、これに伴って x の負の方向への変位が認められる。また、 $\phi_i=15^\circ$, 30° の場合は一様速度の場

図7 初期位置を管路軸から外した場合の線状体の運動(計算による)

(速度分布のある場合: $V_{max}=10\text{ m/s}$)
($L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.3$,
 $x_i=7.5\text{ cm}$, $\phi_i=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$)

場合に比して x の負の方向への変位は小さい。これは線状体に作用する気流速度が一様速度の場合に比して小さいこと、および運動開始当初の速い自転によるものと考えられる。

(iii) 線状体直径の影響

線状体運動に対する直径の影響を検討するために行った計算の結果を図8に示す。図は線状体性状に関する条件のうち、直径 d のみを $20\text{ }\mu\text{m}$ から $40\text{ }\mu\text{m}$ に増し、管路軸上で運動を開始させた場合であって、 $\phi_i=15^\circ$ および 30° とした。 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ の場合の図5(a)と比較すると、つぎのとおりである。まず線状体直径、したがって質量が増加するため、加速が小さい。また、 x の負の方向に大きく押し流されて管壁に近づき、速度勾配の大きい気流の影響を受けて急速に自転しながら y 方向に運動する。なお、 $\phi_i=30^\circ$ のときは、管壁に衝突する。

(iv) 線状体の比重の影響

線状体の比重の影響を図9に示す。これは、上述の計算に用いた線状体の比重 $s=1.3$ を 1.0 および 1.6 に変化させ、 $\phi_i=45^\circ$ 、初期位置を管路軸上とした場合の計算結果である。この場合、流体抵抗は同じであるが、質量の大なるものほど運動初期における加速は小さい。このため、抗力は大きくなって、比重が大きいほど x の負の方向に流される傾向がある。

なお、線状体の長さ L のみを変化させたときは、初期位置と気流の速度分布のいかんによって線状体の挙動

図8 線状体直径を大きくした場合の線状体運動(計算による)
 (速度分布のある場合: $V_{max}=10\text{ m/s}$)
 $L=20\text{ mm}$, $d=40\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.3$
 $x_i=10\text{ cm}$, $\phi_i=15^\circ, 30^\circ$

図9 線状体の運動に対する比重の影響(計算による)

(速度分布のある場合: $V_{max}=10\text{ m/s}$)
 $L=20\text{ mm}$, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $s=1.0, 1.6$
 $x_i=10\text{ cm}$, $\phi_i=45^\circ$

が変化することは上述のいくつかの計算結果から容易に推察できる。例えば、 $L=40\text{ mm}$ の線状体を初期傾き角を $\phi_i=0^\circ$ 、初期位置を管路軸上として運動を開始させた場合、管路軸上を $\phi=0^\circ$ のまま運動するが、その両端

が速度分布の低速領域の影響を受けるため、運動速度は $L=20\text{ mm}$ の場合よりもわずかながら低い。計算に用いた速度分布では、管路軸から管壁近傍までの速度勾配が小さいので、 $\phi_i \neq 0^\circ$ の場合もその姿勢および速度や軌道は $L=20\text{ mm}$ の場合とほぼ同じであった。

5. 線状体の流体輸送実験

矩形断面の真直ぐな管路中を気流あるいは水流によって輸送される線状体の運動を知るために、光検出装置およびマルチ ストロボ撮影による実験を行うとともに、計算結果と比較する。

5.1 光検出装置による実験

(1) 実験装置

管路内を気流によって運動する線状体の速度を求めるため、透明アクリル樹脂製で様な矩形断面 ($10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$) を有する垂直な管路内をブロワ ($8\text{ m}^3/\text{min}$, 600 mmAq) の吸引作用によって運動する線状体を光学的に検出した。このため、管路側壁に設けたスリット (幅 $30\text{ mm} \times$ 高さ 10 mm) を経て管路軸に垂直に平行光線を照射し、管路を出た平行光線をフォト トランジスタ (東芝 OS 14) に集光させた。

図10に検出器の電気回路を示す。管路内を気流によ

図10 検出器の電気回路

て運ばれる線状体 F がスリットを横切り、フォト トランジスタ P_1 への入射光線をささぎったとき、この線状体の投影面積に比例した出力が生じる。また、管路の下流側に適当な距離に設けたフォト トランジスタ P_2 への入射光線を線状体が横切ったときは、上述の出力と逆の出力が生じる。これらの出力は、差動増幅器 D によって増幅され、シンクロ スコープ S によって観察、記録される。

図11は線状体モデルとして直径 $900\text{ }\mu\text{m}$ のピアノ線を用い、その軸を垂直にして管路内を自由落下させた場合のモデル形状とシンクロ スコープ上の波形を示したものである。図中の実線は観測波形を、破線は検出回路の抵抗値に基づいて求めた計算値を示し、両者の間にかなり良好な一致がみられる。しかし、図の(b)(c)のような2

図11 線状体モデル(ピアノ線, $d = 900 \mu\text{m}$)の形状と検出器の出力波形

(——実験値)
(-----計算値)

次元的および3次元的な形状の場合は、その線状体の運動中の姿勢を検出器の出力波形から適確に判断することはむずかしい。本実験では、線状体の平均速度を求めるため、上述の一对のフォト トランジスタを管路に沿って10 cm 間隔で設置し、両出力の時間間隔を測定した。

(2)実験結果

図12は、いずれも長さ $L = 20 \text{ mm}$ で、太さの異なる3種の繊維、すなわちポリエステル、ポリプロピレンおよびナイロンを初速0で速度20 m/s, 40 m/sおよび60 m/sの気流中に供給した場合の運動時間と運動距離の関係を示したものである。図から明らかなように、繊維はきわめて短時間に加速され、繊維が細いほど、また気流速度が大きいほど早く加速されて高速で運動する。

図13に、上記ナイロンについての実験結果と計算値とを気流速度20 m/sと40 m/sの場合について示す。計算値は、繊維が初速0で一様速度の気流中に供給されるものとし、初期傾き角 $\phi_i = 0^\circ$ および 90° として計算した結果をそれぞれ示してある。実験値はいずれもこれら2つの計算値の中間の値をとるが、これは運動中の繊維の軸が必ずしも気流の主流方向と平行でなく、主流方向に対して傾いたり、あるいは真直ぐでなく曲がった状態で運動していることを意味していると考えられる。

5.2 マルチ ストロボ撮影による実験

上述の実験では、運動中の線状体の姿勢を明らかにすることはできなかった。このため、比較的低速の水流中における線状体の運動をストロボ スコープのマルチ フラッシュによって撮影した。

(1)実験装置と方法

図12 繊維の運動距離と運動時間(実験) ($L = 20 \text{ mm}$)

図13 ナイロン繊維(15.2d)の運動に関する実験値と計算値の比較 ($L = 20 \text{ mm}$)

図14は、一様速度の水流を得るために使用した開水路型回流水槽を示す。水槽は透明アクリル樹脂製で、高さ250 mm×幅250 mmの正方形断面を有している。回流水槽のベンド部には、図のようにほぼ等間隔で整流板を、

図14 回流水槽(単位:mm)

また観測領域(斜線部)である直線部の上流には整流格子と整流網を設けて、流速の一樣化をはかっている。

図15は水素気泡法によるタイムラインによって可視化した観測領域のフローパターンであって、水槽の幅方向で流速分布が一樣であることを示している。なお、水槽の高さ方向についても流速分布は一樣であることを

図15 観測領域の流速分布

確かめた。

実験では、この観測領域の上流側断面中央部においてモデル線状体を水平に支持し、静止状態から運動を開始させて、これを水槽側面から高照度型ストロボスコープ(菅原製作所, PS-240)のマルチフラッシュにより照明することにより、水槽上方から写真撮影した。実験に使用したモデル線状体は、直径 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ 30 mm のナイロンであって、写真撮影のために白色塗装した。実験時の平均流速は約 40 mm/s である。

(2)実験結果

図16(a)は初期傾き角 $\phi_i=0^\circ$ で運動を開始させ、 160 rev/min のマルチフラッシュによって撮影した結果を示す。図より、線状体はほとんど瞬間的に加速され、運動開始時と同じ姿勢を保ったまま流れの方向に沿って真直ぐに一定速度で運動することがわかる。図16(b)は流速を 40 mm/s とし、実験と同じ線状体について数値計算した結果を示す。ここで、水の ρ および ν は、それぞれ実験時の水温 19°C における値、すなわち $\rho=101.8\text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 、 $\nu=1.036\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ を使用した。計算は $\Delta T=0.001\text{ s}$ とし、(b)では(a)と同一時間間隔における線状体の位置と姿勢を示してある。図から明らかなように、計算値と実験値はかなり良く一致している。

また、図17(a)は同じ物体について、 $\phi_i=30^\circ$ とした場合の実験結果を、また図(b)は数値計算の結果を示す。この場合は、先に図4(b)でも示したように、線状体の軌道は流れ方向から外れるが、自転を伴わず、初期傾き角を保ったまま運動することがわかる。

以上の実験から、本研究に用いた計算方法および条件によれば、流体の平行な流れにより比較的短い距離を運ばれる線状体の運動をかなり正確に予測できることがわかる。

図16 水流中における線状体の運動 ($\phi_i=0^\circ$)

図17 水流中における線状体の運動 ($\phi_i=30^\circ$)

6. 結 論

本研究では、真直な管路中を流体によって輸送される単一線状体の運動を知るため、これを理論的に考察し、運動方程式を導くとともに、数値計算によって線状体の挙動とこれに影響を及ぼす要因について検討した。また、実際に管路中を気流あるいは水流によって運ばれる線状体について実験を行い、計算結果と比較した。本研究で得られた結果を要約すると、つぎのとおりである。

(1) 真直ぐな管路内の二次元平行流れ中において、線状体の各部に作用する流体の速度成分を考慮し、線状体の並進運動および線状体軸に垂直な軸のまわりの自転運動に関する運動方程式を導いた。

(2) 数値計算により、線状体が初速0で管路内の流れのなかで運動を開始した場合について、流体の速度分布、線状体の直径、比重、初期傾き角、初期位置などが線状体の軌道や姿勢に及ぼす影響を検討し、つぎのような結果を得た。

(i) 流体速度が一様な場合は、初期傾き角 ϕ_i に応じて軌道は変化し、 $\phi_i=0^\circ$ および 90° では流れ方向に直進するのに対し、それ以外の ϕ_i では流れ方向と垂直な方向への変位を伴いながら運動する。しかし、いずれの場合も線状体は自転することなく、運動開始時の姿勢のまま運動する。

(ii) 管路軸に関して対称な速度分布を有する流れの場合は、一様速度の場合と同様に初期傾き角によって軌道は変化するが、管路軸から線状体重心が外れた場合や初期位置を管路軸から外した場合は、線状体各部に作用する流体の速度成分の非対称性により線状体は流れの方向に平行になるように自転し、これに伴って軌道は流れ方向

に近づく。

(iii) 線状体直径が大なるほど加速は遅い。また、これによって流れ方向と垂直な方向への変位は大きくなり、流体の速度分布に応じて運動姿勢も変化する。

(iv) 線状体の比重の増加は加速を遅くし、直径の増加と同様な影響を与えるが、運動姿勢や軌道に及ぼす影響は、直径変化によるものよりも小さい。

(v) 線状体の長さの影響は、本研究で用いた速度分布や線状体長さの範囲では非常に小さい。

(3) フォト トランジスタを用いた検出器による検出およびマルチ ストロボ写真撮影により管路中の気流および水流によって運ばれる線状体の運動を観測し、計算値と比較した。この結果、実験値は計算値とかなり良く一致した。このことから、本研究で求めた運動方程式および計算法により、真直ぐな管路内の平行流れ中を運動する線状体の挙動をかなり正確に予測できることがわかった。

終りに実験に協力された関 正、福村信二、姜吉永、畑中義明、南本康弘の諸氏に感謝の意を表する。

なお、本研究の一部は昭和51年本学会年次大会研究発表会で発表したものである。

参考文献

- 1) L., Feldman, Text. Res. J., **36**, 809 (1966)
- 2) J., Ripka, 海外繊維技術文献集, **19**, 448, (1969)
- 3) B., Edberg, Studies in Modern Yarn Production, p. 96, 1968, Textile Institute
- 4) 池田ら; 繊維連合講演会講演前刷, 1969
- 5) G., Lange et al.; Deutsche Textiltechnik, **22**, 151 (1972)
- 6) 堀川, 千葉, 西谷, 上島; 繊維機械学会論文集, **33**, T116 (1980)
- 7) 堀川, 千葉, 西谷, 上島; 繊維機械学会論文集, **34**, T110 (1981)

8) S., Hoesner; Fluid Dynamic Drag, p. 3-9, Published by the author, (1965)

〈付録〉繊維の摩擦抵抗係数

繊維のように細い線状体の摩擦抵抗係数については、加瀬ら^{A1)}、佐野ら^{A2)}あるいは浜名^{A3)}など紡糸時における繊維の空気抵抗に関する報告があるが、一般に実用的なデータはきわめて少ない。このため、本研究ではこれを実験によって求めた。

(1)測定原理と実験装置

いま、真直ぐで細い線状体を気流方向においた場合、物体の前面および後端面が抗力に及ぼす影響はほとんど無視できるほど小さい。したがって、細い線状体に作用する抵抗のうち、圧力抗力はほとんど無視でき、物体の受ける抵抗は物体表面に働く摩擦抵抗のみと考えてよい。そこで、線状体に働く全摩擦抵抗力 F は式 (A・1) で与えられるとし、下記の実験によって求めた各種繊維についての F の値から摩擦抵抗係数 C_f を得た。

$$F = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot d \cdot L \dots \dots \dots (A \cdot 1)$$

付図1は実験装置の概略を示す。試料繊維はトーションバランスのアームから垂直に吊下られ、その直下

付図1 摩擦抵抗力の測定装置

に軸を垂直にして設けた円管（透明アクリル樹脂製、内径 15 mm、長さ 320 mm）の中心を通して円管内にみちびかれる。円管内には、ブロウ（8 m³/min、585 mmAq）の吸引作用とバルブによって任意速度の気流が得られる。また、繊維に作用する摩擦抵抗力 F は、直接トーションバランスによって測定される。

(2)実験結果

付図2は実験結果の一例を示し、ポリエステル繊維

付図2 試料長と摩擦抵抗力
(ポリエステル繊維 2.1d)

(2.1 d) についての試料長と摩擦抵抗力の関係を、気流速度をパラメータとして示したものである。図に見られるように、実験の範囲内では試料長と摩擦抵抗力の間に良好な直線関係がある。

付図3は F の実測値から式 (A・1) に基づいて計算

付図3 繊維の摩擦抵抗係数

(I) : d を代表寸法とした $R_e \sim C_f$
(II) : L " " " $R_e \sim C_f$
(III) : L " " " $R_e \sim L/d=10$ の円柱の C_f

した各種繊維の C_f の値をレイノルズ数 R_e に対してプロットしたものである。図中の (I) は繊維直径 d を代表寸法とした R_e に対して、また (II) は繊維長 L を代表寸法とした R_e に対して C_f をプロットした場合を示している。なお、図中の一点鎖線 (III) は $L/d=10$ の円柱状

物体の C_f と、代表寸法を L にとった Re との関係^{A4)}であり、図の Re の範囲では平板の場合とよく似た傾向を示している。

付図 3 からわかるように、 L を代表寸法とした Re についての C_f の値(Ⅱ)は、(Ⅲ)の値よりも大きい、これは実験に用いた細い線状体では、平板や円柱などの場合に見られる剝離が生じにくいためと考えられる。

本研究では細い線状体が気流方向に対してわずかに傾いた場合、境界層の発達を阻害または緩和するように、気流が物体面に沿って線状体軸に垂直な方向に まわり

込むと考え、繊維直径 d を代表寸法にとった Re と C_f の関係を示すプロット(Ⅰ)(本文図 2)をもとに実験式を求めた。

参考文献

- A 1) S. Kase, T. Matsuo: J. Appl. Polymer Sci., **11**, 251 (1967)
- A 2) 佐野, 折居; 繊維学会誌, **24**, 212 (1968)
- A 3) 浜名; 繊維の形成と構造の発現, p. 107, 化学同人 (1967)
- A 4) S. Hoerner, Fluid; Dynamic Drag, p. 2-1, Published by the author (1965)