流れ中における線状体の運動

(第3報) 矩形管内の助走域での運動特性

大阪大学工学部	堀	川	明 (会員)
〃	〃	千	葉 訓 司 (〃)
〃	〃	山	路 克 彦

Motion of a Slender Body in Flow.

Part 3 : Behaviors in Entrance Region of Rectangular Duct.

Akira Horikawa, Kunji Chiba and Katsuhiko Yamaji,

Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita, Osaka.

Abstract

In this paper, equations of a slender body motion in flow which were derived in Part 1 of this series have been applied to the falling motion in the hydrodynamic entrance region of a horizontal rectangular duct. The calculated results in this flow have been compared with those in both uniform and fully developed flow. Influences of fluid velocity and slender body length on the behaviors of the body have been investigated. The validity of this theoretical analysis has also been discussed by comparison with the experimental results. The obtained results are as follows :

(1) The trajectory of the body mass center in the hydrodynamic entrance region forms a curve composed of both the trajectory curve in uniform flow and that in fully developed flow. In this flow, the fluid velocity influences the trajectory to a medium degree among three different flow states. It has been found that the body with small length rotates its posture into vertical in the bottom boundary layer region, but in the case of longer length the body does not rotate into vertical. This result is contrary to that in fully developed flow. However it should be noticed that this phenomenon is related to the rectangular duct height.

(2) The translational and angular velocity against the inclination angle in this entrance region change in the range between the curves which express those changes in uniform and fully developed flow. The flow development depends on the mean fluid velocity and the influences of the fluid velocity on the body behaviors contain this effect, so that its influences are less clear than those in other two flows. It is found that the longer body has a larger angular velocity within the extremely small region immediately after the beginning of the motion for the reason that the present calculations are carried out under the condition of relatively small flow development.

(3) The body behaviors and the influences of fluid velocity and body length obtained by numerical calculation almost agree with experimental results. So that, it is valid to calculate the motion of a slender body in flow by means of the equations of motion derived in this series.

(Received July, 28, 1982)

摘 要

第1報¹⁾で導いた線状体の運動方程式を水平な矩形管内の助走域での運動に適用した。そして、水平な一様流れ中¹⁾および十分に発達した水平流れ中²⁾の計算結果と比較して、線状体が単一で自由落下するとき、流速および線状体長さが助走域での運動特性に及ぼす影響を調べた。また、あわせておこなった実験によりこの理論の妥当性を検討した。得られた結果はつぎのとおりである。

(1) 助走域での線状体重心の軌跡は、一様流れ中と十分に発達した流れ中の軌跡を合わせたような形になる。また、軌跡に及ぼす流速の影響も両者の中間的なものになる。さらに、長さの小さい線状体は管路底面近傍の境界層内で鉛直な姿勢をとる向きに回転し、長さが大きくなると鉛直には回転しない。この結果は、十分に発達した流れ中の結果と逆である。しかし、これは管路高さとの関連によって生じた現象である。

(2) 姿勢の変化に対する重心の速度および角速度の変化も、一様流れ中と十分に発達した流れ中での変化の中間に位置する。また、平均流速により流れの発達程度が異なり、その影響が流速の影響に含まれるため、助走域では一様流れ中および十分に発達した流れ中の場合より流速の影響が現われにくい。今回の計算に用いた助走域は比較的発達程度が小さいため、運動開始直後の領域では長さの大きい線状体の角速度が大きくなる。

(3) 助走域での運動特性および流速、長さの影響は実験結果と計算結果で一致する。したがって、ここで用いた理論により流れ中での線状体の運動をかなりの精度で予測することができるはずである。

(昭和57年7月28日受理)

1. まえがき

本報では、第1報¹⁾で導いた運動方程式を用い、水平な矩形管内の助走域での線状体の運動を流速および線状体長さを変えて数値計算する。そして、水平な一様流れ中²⁾および十分に発達した水平流れ中²⁾での計算結果と比較して助走域での運動特性を明らかにする。また、助走域での線状体の落下実験から得られた結果と計算結果を比較し、この理論の妥当性を検討する。

助走域の流れは、一様流れの状態から境界層が徐々に発達している段階の流れである。したがって、一様流れ中、十分に発達した流れ中および助走域での線状体の運動を調べることで、矩形管内のすべての流れ状態における運動特性を把握することができる。

2. 助走域における流速分布の検討と線状体の落下実験

2.1 実験装置

繊維を採取う各種工程では、繊維は空気中で運動する場合がほとんどである。しかし、水中の方が線状体の運動の観察が容易なこと、および、空気は一般に圧縮性流体であると考えられるが、音速に比べて遅い空気の流れの場合、非圧縮性流体として取扱うことができ、しかも水も空気も粘性流体であり、線状体に働く抗力はレイノルズ数 Re の関数として定まるので、理論解析が実験により検証できれば空気中での運動は数値計算で予測できる。したがって、流体として水を用いた。

実験装置の概要を図1に示す。水は貯水タンク⑨から

図1 実験装置概要

ポンプ⑪によりポンプ流量調節用バルブ⑫を経てヘッドタンク①へ送られる。ヘッドタンク内ではオーバーフローにより位置水頭が一定に保たれる。ヘッドタンクを出た水は流量測定オリフィス②を通り、バルブ④を経て整流部⑤へ入る。整流部では整流格子⑬と金網⑮により、下流の金網から流出した流れはほぼ一様となり、線状体の落下実験をおこなうテスト部⑥へ入る。テスト部を通

過した流れは、バルブ⑧を経て貯水タンクへ排出される。なお、ヘッドタンクでオーバーフローした水も貯水タンクへもどる。このように、本実験装置の流れは循環型である。

流量調節はバルブ④と⑧でおこない、この流量に対応する貯水タンクからヘッドタンクへの送水量はポンプ用バルブ⑫で調節する。また、オリフィスの差圧は、四塩化炭素を用いたU字管マンオメータ③で測定する。

テスト部は、高さ400 mm、幅100 mmであり、透明アクリル板で製作し、線状体をマルチストロボ撮影する際背景となる後面にはストロボランプの光が反射して線状体の落下状態が不鮮明にならないよう、つや消し黒色塗装した。

線状体落下装置⑦は、流れをできるだけ乱さないようにテスト部上面に隣接して取付けてある。そして、落下装置とテスト部は4×65 mmのスリットでつながっている。なお、線状体の初期位置は、整流部の下流側の金網から700 mm下流である。

2.2 助走域における流速分布の測定

整流部を通過した流れはほぼ一様になっているので、線状体が運動をおこなうテスト部では流れが発達している。そこで、線状体の落下実験をおこなう前にテスト部の流速分布を調べる必要がある。

本実験では、平均流速 U が最大80 mm/sと低速であるため、ピトー管等による測定は困難であり、トレーサ法でおこなった。トレーサ粒子としてアルミ微粉末とポリスチレンビーズを用い、一定の露光時間、一定の露光間隔でトレーサ粒子の描く軌跡を撮影し、その軌跡の長さおよび間隔から流速分布を求めた。

流速分布測定装置の概要を図2に示す。座標系は、管断面の中心を原点(0)とし、鉛直方向上向きに η 軸、水平面内流れの向きに ξ 軸、流れに直角に ζ 軸とした。

ランプ⑦の光を幅1 mm、長さ100 mmの2重スリット④で平行光線にし、 ξ 面に平行にテスト部①の前面

図2 流速分布測定概要

から投入する。その際、回転円板⑤を2重スリットの間で回転させ、光が円板の穴を通るとき以外は遮断されるようにする。したがって、トレーサ粒子は断続的に光る。また、円板の回転数を変更すると露光時間と露光間隔が変えられる。

流速測定部⑩は、線状体の初期位置から上流へ150～250 mm の範囲と下流へ550～650 mm の範囲の2か所である。それぞれの測定部で、壁面近傍10 mm 間隔、中央部20 mm 間隔、合計21の ξ と面に平行な面におけるトレーサ粒子の軌跡を管路上方からカメラ③で撮影した。なお、線状体の落下実験を $U=20, 40, 60, 80$ mm/s でおこなうので、 $U=20$ と80 mm/s に対し流速分布を測定した。

つぎに、撮影されたトレーサ粒子の軌跡から流速を求める方法を説明する。

図3において、 H は流路幅であり、実際の長さは100

図3 トレーサ粒子の軌跡の模式図

mm である。 h はトレーサ粒子が円板1回転当りに移動する距離、 h' は粒子が光っている長さで、回転円板の穴の中心角が90°であるから、 $h'=h/4$ である。また、 Z は壁面から粒子までの距離である。

H と h (あるいは h')を写真面上で測れば、次式から流速 u_f (mm/s) が求まる。

$$u_f = \frac{5}{3} h N / H \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 N は円板回転数 (rpm)、 h 、 H の単位はmmである。

また、 Z は次式から本実験装置で設定した ξ 座標に換算できる。

$$\xi = 100 Z / H - 50 \dots\dots\dots (2)$$

このようにして、 $-50 \leq \xi \leq 50$ mm で u_f を数十点求めると η ＝一定の位置での ξ 方向の流速分布が得られ、これを $-200 \leq \eta \leq 200$ mm の各測定位置で繰返せば管内流速分布が求まる。

2.3 流速分布の測定結果と数値計算結果の比較

Han³⁾は、流速ベクトルを $w(u_f, v_f, w_f)$ としたとき次式で表わされる定常境界層方程式

$$\left. \begin{aligned} &u_f \partial u_f / \partial \xi + v_f \partial u_f / \partial \eta + w_f \partial u_f / \partial \zeta \\ &= -\frac{1}{\rho} \partial p / \partial \xi + \nu (\partial^2 u_f / \partial \eta^2 + \partial^2 u_f / \partial \zeta^2) \dots\dots (3) \\ &\partial p / \partial \eta = 0, \partial p / \partial \zeta = 0 \end{aligned} \right\}$$

の慣性項を $\nu \beta^2 u_f$ で置換えることによって、非線形方程式を

$$\begin{aligned} &\partial^2 u_f / \partial \eta^2 + \partial^2 u_f / \partial \zeta^2 \\ &= \beta^2 u_f + \frac{1}{\mu} dp / d\xi \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

のように線形化するという手法に基づいて矩形管の助走域での層流の流速分布を計算している。ただし、 $\beta = \beta(\xi)$ であり、座標系は流速測定時と同一である。(4)式の解は、 $\beta = 0$ ($\xi = \infty$) のとき十分に発達した流速分布を表わし、 $\beta = \infty$ ($\xi = 0$) のとき一様な流れを表わす。

ここで、2.1節で述べたように、整流部の下流側の金網から流出した流れはほぼ一様になっているのでこの位置を矩形管の入口部 ($\xi = 0$) と考えた。そして、流速分布の計算は、Hanの方法により $\xi = 500$ と1300 mm の位置 (これは線状体の初期位置から上流へ200 mm と下流へ600 mm 位置であり、流速測定部の中心位置である) に対しておこない、測定結果と比較した。

また、水の動粘性係数は、流速測定時の水温25℃に対する値 $\nu = 0.893$ mm²/s とした。

図4、5に $U=80$ mm/s の場合の計算結果と測定結果が併記しており、実線が計算結果である。なお、流速 u_f

図4 矩形管幅方向の流速分布

図5 矩形管高さ方向の流速分布

は平均流速 U で、位置 η 、 ξ はそれぞれの最大値 ($\eta_{max} = 200\text{ mm}$, $\xi_{max} = 50\text{ mm}$) で無次元化し * の印を付けて表わす。

$\xi = 500\text{ mm}$ では、流速は $-0.6 < \xi^* < 0.6$ および $-0.6 < \eta^* < 0.6$ の範囲でほぼ一様となり、 $\xi = 1\,300\text{ mm}$ では、 $-0.4 < \xi^* < 0.4$ 、 $-0.5 < \eta^* < 0.5$ でほぼ一様である。また、最大流速は $\xi = 500\text{ mm}$ で約1.08、 $\xi = 1\,300\text{ mm}$ で約1.18となり、テスト部でわずかであるが流れが発達していることがわかる。

図4から幅方向の流速分布は計算と測定ではほぼ一致している。一方、図5で高さ方向の分布は、 η^* が0.6程度までは一致しているが、 $\eta^* > 0.6$ では測定値の方が小さくなる。なお、ここには記載しないが、 $U = 20\text{ mm/s}$ の場合境界層の発達が早く、最大流速は $\xi = 500$ 、 $1\,300\text{ mm}$ でそれぞれ約1.15、1.35となり、計算値と測定値は一致する。

以上のように、管路高さ方向の流速分布は計算値と測定値でかなりの差があるが、幅方向の分布および最大流速はほぼ一致しており、また、Sparrow の報告⁴⁾でもHanの方法は流れがあまり発達していない領域で測定結果と良く一致することが確認されているので、線状体の運動を数値計算する際、流速分布はHanの方向により計算する。

2.4 線状体の落下実験方法

流量はオリフィス②の差圧が所定の値になるように2個の流量調節用バルブ④、⑧で調節した(図1参照)。そして、流れが定常になったのち線状体を管路幅方向の中心面内で落下させ、図6に示すように管路側方と上方の直角2方向からNo.1カメラ⑤とNo.2カメラ⑥により、その運動状態をマルチ ストロボ撮影した。撮影では、実験室全体を暗くし、線状体が十分に光るようにストロ

図6 線状体の撮影概要

ボ ランプ⑦を落下にあわせて移動した。また、管路底面には落下点測定用グラフを取付け、線状体の最終落下位置を調べた。なお、座標系は、初期位置での線状体重心を通る鉛直線と管路上面の交点を原点(O)とし、水平方向流れの向きにOX、鉛直方向下向きにOY、管路幅方向にOZとした。

線状体落下装置は既報⁵⁾で用いたものと同じ構造であり、図7にその概要を示す。2枚の透明塩化ビニール板②(立面図でハッチングを入れた部分)の間に取付けた初期回転角設定用円グラフ⑤により所要の初期回転角 $\theta_{0,e}$ に線状体⑩を設定し、ピンセット取付用ねじ④を締めて固定する。つぎに、この塩化ビニール板を固定枠⑧の中へ入れ、ピンセット押上げ用ねじ③を回し、ピンセット⑦を押上げると線状体がスリット⑨を通してテスト部

- ① テスト部
- ② 塩化ビニール板
- ③ ピンセット押上げ用ねじ
- ④ ピンセット取付用ねじ
- ⑤ 初期回転角設定用円グラフ
- ⑥ 落下装置内挿用箱
- ⑦ ピンセット
- ⑧ 固定 枠
- ⑨ 線状体落下用スリット
- ⑩ 線 状 体

図7 線状体落下装置概要

表1 試料条件および実験条件

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体密度 ρ_b (g・s ² /mm ⁴)	初期回転角 $\theta_{0,e}$ (°)	平均流速 U (mm/s)
1	鉛 筆 芯	0.378	30 60	1.828×10^{-7}	0	20
		0.569	15 30	1.659	- 2	40
			45 60			60
		0.720	30 60	1.673	- 5	80
0.912	1.593					
2	ピアノ線	0.217	30 60	7.238	0	20
		0.322	15 30		- 2	40
			45 60			60
		0.428	30 60		80	
0.527						

①へ入る。

実験には鉛筆の芯 (No. 1 試料) とピアノ線 (No. 2 試料) の2種類の試料を用いた。それらの試料および実験条件を表1に示す。ここで、初期回転角 $\theta_{0,e}$ は初期位置での線状体の軸方向が鉛直方向となす角度である。図7に示すように流れの向きを右から左としたとき、線状体は流れに入る瞬間、時計回りに大きく回転するため、鉛直に近い姿勢での運動状態が把握できない。そこで、実験では線状体を鉛直線に対し反時計回りの向きに傾け落させた。数値計算では、初期回転角 θ_0 は落下実験の場合と逆の向きに設定しており、しかも、回転角 θ の定義(線状体の軸に直角な方向の流れ方向に対する角度)からも、本実験における $\theta_{0,e}$ の値は負とするのが妥当である。

実験では、各実験条件につき15本程度の線状体を落下させた。そして、最終落下位置での線状体重心の水平方向移動距離の平均値を求め、この値に近い実験を2個ないし3個選び、それらの写真から線状体両端の座標を読む。重心の水平方向速度 $\dot{X}$ 、鉛直方向速度 $\dot{Y}$ は既報⁹⁾ の3.2節で述べた方法で求める。2個ないし3個選んだ実験について、軌跡、重心の速度、姿勢の変化を図示し、そのうちの1つを実験データとして採用した。

3. 助走域における線状体の運動の数値計算

図8に示すように、線状体に固定した移動座標系を ox, oy 、その原点(線状体の重心)の座標を (X, Y) とする。ただし、 OX, OY 座標系の原点は線状体の初期位置 Y_0 である。また、矩形管内での位置は、管路入口部(境界層が発達し始める位置)の断面中心を原点とする (ξ, η) 座標で表わす。さらに、線状体の運動を数値計算する際にも図1の整流部の下流側の金網位置を $\xi = 0$ と考え、入口部から初期位置までの ξ 方向距離を $\xi_0 = 700 \text{ mm}$ とする。

図8 座標系

ここでは、線状体が管路幅方向の中央面 ($\xi^* = 0$) 内で運動する場合について数値計算するので、流速 u_f^* に関しても $\xi^* = 0$ の位置での分布がわかればよい。流速分布は2.3節で述べた Han の方法で計算する。

つぎに、数値計算の方法について述べる。図8から、線状体上の任意の位置 i は

$$\left. \begin{aligned} \xi &= X - y \sin \theta + \xi_0 \\ \eta^* &= \eta/a + 1 + (Y + y \cos \theta - Y_0)/a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

である。この点での流速 W_i は

$$W_i = U \cdot u_f^*(\xi_i, \eta_i^*) \dots\dots\dots(6)$$

で得られる。しかし、線状体に作用する外力、回転モーメント、さらに、第1報の(17)式で表わされる U_1, V および $dU_1/dt, dU_2/dt, dV/dt$ を計算する際、線状体を長さ Δl の n 個の微小要素に分け、各要素に対する値の総和でこれらの値を求めるので、各要素の重心の位置 y_i における流速を逐一 Han の方法で計算すると計算時間が非常に長くなる。そこで、線状体の運動を数値計算する前に、線状体が運動すると予想される領域を直交格子で分割し、各格子点 (ξ_j, η_k^*) での流速 $u_f^*(\xi_j, \eta_k^*)$ を1回だけ計算しておき、 W_i は $u_f^*(\xi_j, \eta_k^*)$ から内挿する。

ξ 方向の流速の変化は η^* 方向の変化に比べて小さいので、 W_i の内挿には $\xi_{j-1} \leq \xi_i \leq \xi_j$ と $\eta_{k-1}^* \leq \eta_i^* \leq \eta_k^*$ を

満足する ξ 方向2列, η^* 方向5行 ($\eta_{k-2}^*, \eta_{k-1}^*, \eta_k^*, \eta_{k+1}^*, \eta_{k+2}^*$)の計10個の格子点での値を用いる。まず, $\xi = \xi_{j-1}$, $\eta^* = \eta_{k-2}^*, \eta_{k-1}^*, \eta_k^*, \eta_{k+1}^*, \eta_{k+2}^*$ の格子点の値から η^* 方向の流速を4次式近似し, (ξ_{j-1}, η_i^*) での流速 $u_f^*(\xi_{j-1}, \eta_i^*)$ を内挿する。同様に $u_f^*(\xi_i, \eta_i^*)$ を求める。その後比例配分により $u_f^*(\xi_i, \eta_i^*)$ を求め, (6)式から W_i を計算する。

水平方向に対する流れの角度は $\theta_f = 0$ であるので, $m+1$ 番目の運動を計算する際必要となる m 番目の U_1 , V は第2報²⁾の(5)式と同様に

$$\left. \begin{aligned} U_1^{(m)} &= \sum_{i=1}^n W_i^{(m)} \cos \theta^{(m)} \cdot \Delta l / l \\ V^{(m)} &= - (W_{e1}^{(m)} + W_{e2}^{(m)}) \sin \theta^{(m)} / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

から求める。また, 第2報²⁾の(6)式から

$$\left. \begin{aligned} dU_1/dt &= \frac{1}{l} \left(\cos \theta \int_{-l/2}^{l/2} dW/dt \cdot dy \right. \\ &\quad \left. - r \sin \theta \int_{-l/2}^{l/2} W dy \right) \\ dU_2/dt &= \frac{12}{l^3} \left(\cos \theta \int_{-l/2}^{l/2} dW/dt \cdot y dy \right. \\ &\quad \left. - r \sin \theta \int_{-l/2}^{l/2} W y dy \right) \\ dV/dt &= -\frac{1}{2} \left(\sin \theta \cdot d(W_{e1} + W_{e2})/dt \right. \\ &\quad \left. + r \cos \theta (W_{e1} + W_{e2}) \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となる。ただし, r は角速度である。

ここで, m 番目の dW/dt は $m-1$ 番目と m 番目の流速 $W_i^{(m-1)}$, $W_i^{(m)}$ を用いて

$$(dW/dt)_i^{(m)} = (W_i^{(m)} - W_i^{(m-1)}) / \Delta t \dots\dots\dots (9)$$

から求める。ただし, Δt は $m-1$ 番目から m 番目までの時間である。したがって, m 番目の dU_1/dt , dU_2/dt , dV/dt は

$$\left. \begin{aligned} (dU_1/dt)^{(m)} &= \\ &= \left(\cos \theta^{(m)} \cdot \Delta l / l \right) \sum_{i=1}^n (W_i^{(m)} - W_i^{(m-1)}) / \Delta t \\ &\quad - (r^{(m)} \sin \theta^{(m)} \cdot \Delta l / l) \sum_{i=1}^n W_i^{(m)} \\ (dU_2/dt)^{(m)} &= \\ &= \left(12 \cos \theta^{(m)} \cdot \Delta l / l^3 \right) \sum_{i=1}^n (W_i^{(m)} - W_i^{(m-1)}) y_i / \Delta t \\ &\quad - (12 r^{(m)} \sin \theta^{(m)} \cdot \Delta l / l^3) \sum_{i=1}^n W_i^{(m)} y_i \\ (dV/dt)^{(m)} &= \\ &= -(\sin \theta^{(m)} / 2) \{ (W_{e1}^{(m)} + W_{e2}^{(m)}) - (W_{e1}^{(m-1)} \\ &\quad + W_{e2}^{(m-1)}) \} \\ &\quad / \Delta t - r^{(m)} \cos \theta^{(m)} (W_{e1}^{(m)} + W_{e2}^{(m)}) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

から計算する。なお, 初期状態から2番目の運動状態を

計算するには(10)式の第1項を0とした。

以上のようにして, U_1 , V および dU_1/dt , dU_2/dt , dV/dt を求め, 第1報¹⁾の運動方程式(8)式と重心の速度を表わす(9)式を連立させて数値計算し, 線状体の運動状態を求めた。

数値計算は $d=0.569$ mm, $l=30$ mmのNo.1試料に対し $U=20, 40, 60, 80$ mm/s, $l=60$ mmに対し $U=60$ mm/sでおこなった。なお, 初期条件は第1報¹⁾の表1と同じであり, 水の物性値も同様に, 密度 $\rho=1.018 \times 10^{-7}$ gs²/mm⁴, 動粘性係数 $\nu=1.058$ mm²/sである。また, 初期位置は十分に発達した流れ中の場合と同一の $Y_0=30$ mmとした。

4. 助走域における線状体の運動特性

ここでは, 第1報¹⁾, 2報²⁾の水平な一様流れ中および十分に発達した水平流れ中での計算結果と比較しながら, 流速が水平方向(流れ方向)および鉛直方向に沿って分布する流れ中での線状体の運動特性と要因の影響を明らかにする。なお, 座標系の定義より Y , $\dot{Y}$ の結果は負となるが, 鉛直方向下向きを正の向きとして図示する。

4.1 線状体の軌跡

図9に $l=30$ mm, $U=20 \sim 80$ mm/sの場合の軌跡を示す。図中には重心の軌跡と時間間隔 $\Delta t=0.2$ sごとの線状体の運動状態が記載してあり, 線状体の軸方向に沿

図9 軌跡に及ぼす流速の影響(計算結果)

って流速が変化するので, 線状体の長さは座標軸のスケールにあわせて記載した。なお, 座標系原点を管路上面にとっているため, 初期位置は $Y=30$ mmである。また, 図9には $U=60$ mm/sの一様流れ中での軌跡(破線, $\Delta t=0.4$ s)と十分に発達した流れ中での軌跡(一点鎖線, $\Delta t=0.2$ s)が併記してある。

助走域では, U により流れの発達程度が異なり, U が小さいほど発達が早い。たとえば, 初期位置での流速は $U=20$ mm/sの場合 $u_f^*=1.22$, $U=80$ mm/sの場合 $u_f^*=1.14$ となる。また, 管路上面近くの領域での流速勾配は十分に発達した流れに比べて小さいので, 姿勢を水平

に回転させる向きに働く回転モーメント $\mathbf{N}$ の値も助走域の方が小さい。したがって、姿勢の変化は一樣流れ中の場合よりわずかに大きい、十分に発達した流れ中の場合に比べてはるかに小さい。このため、軌跡の接線勾配 dY/dX が極大になる点(加速度ベクトルと速度ベクトルの方向と向きが一致する点)における dY/dX の値、そのときの回転角 θ と鉛直方向に移動した距離は、一樣流れ中と十分に発達した流れ中の値の中間の値となる。

十分に発達した流れ中では、管路底面近く領域で、線状体重心の運動方向が急激に鉛直方向に近づくが、 $l=30\text{ mm}$ の場合この領域で姿勢がほとんど水平であり、線状体は鉛直姿勢をとる向きには回転しない。ところが、助走域では十分に発達した流れ中の場合に比べて線状体の姿勢の変化が小さく、底面近くの領域に入るときの姿勢はより鉛直に近い。たとえば、 $U=80\text{ mm/s}$ の場合、重心の水平方向速度 $\dot{X}$ が急激に減少し始めるときの姿勢と位置は、十分に発達した流れ中では $\theta=79^\circ$ 、 $Y=300\text{ mm}$ 、助走域では $\theta=65^\circ$ 、 $Y=365\text{ mm}$ である。このため、助走域では重心の運動方向が急激に鉛直方向に近づくとともに $U\geq 40\text{ mm/s}$ の場合、線状体は鉛直姿勢をとる向きに回転し始める。 $U=20\text{ mm/s}$ の場合、姿勢は他の場合によりわずかに鉛直に近いが、線状体の軸方向に沿った流速の差が小さいことと、鉛直方向速度が大きいことこの現象が生じなかったと考えられる。

また、管路底面近くの領域において、十分に発達した流れ中の場合、 U が大きいほど重心の運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象が顕著に現われ、しかもそれ以前の領域で運動方向がより水平であったにもかかわらず底面に到達したとき鉛直に近くなる(第2報、図4参照)。これに対し助走域では U による差は明確に現われず、管路底面到達時の運動方向もそれ以前の領域と同様 U が小さいほど鉛直に近いことがわかった。

ここで、表2に dY/dX の最小値およびそのときの θ の値とそれまでに線状体が水平および鉛直方向に移動する距離 $X_m(=X)$ 、 $Y_m(=Y-30)$ を示す。

助走域では十分に発達した流れ中の場合と同様、 U が大きいほど、同一姿勢における重心の運動方向は水平に

近く、加速度ベクトルの方向は鉛直に近い、ため、 dY/dX の最小値は小さく、そのときの θ の値は大きくなる。しかし、十分に発達した流れ中の場合と異なり、助走域では線状体が底面近傍の境界層内に入り水平および鉛直方向加速度 $\ddot{X}$ 、 $\ddot{Y}$ が急激に変化し始めた直後に dY/dX は最小になる。

助走域での dY/dX の値は一樣流れ中(第1報¹⁾の表2)の値と十分に発達した流れ中(第2報²⁾の表1)の値の中間となり、そのときの θ の値は助走域の場合がもっとも小さく、 U による θ の値の差も他の場合より小さいことがわかる。

つぎに、図9において助走域の場合、重心の運動方向が線状体の軸方向と一致するときの θ の値は、 $U=20, 40, 60, 80\text{ mm/s}$ に対し $\theta=16.6^\circ, 35.6^\circ, 49.0^\circ, 57.6^\circ$ と他の2種類の流れ中の値の間に入る。また、重心の軌跡は、十分に発達した流れ中、助走域、一樣流れ中の順番に下流側に位置する。

以上の結果から、助走域での重心の軌跡は一樣流れ中と十分に発達した流れ中の軌跡をあわせたような形になり、流速の影響も両者の中間的なものになることがわかる。なお、 $l=30\text{ mm}$ の場合でも管路底面近くで線状体が鉛直姿勢をとる向きに回転する現象がみられたが、これは管路高さに関連があり、今より高さを大きくして計算すればこの現象は生じない。

管路底面近くの領域における助走域と十分に発達した流れ中の軌跡の違いは、 $l=60\text{ mm}$ の線状体の軌跡にもみられる。線状体長さの影響を表わす図10には一点鎖線で発達している流速分布が示してあり、線状体は $\Delta t=0.2\text{ s}$ ごとに記載してある。

十分に発達した流れ中では、 $l=60\text{ mm}$ の場合、この領域で重心の運動方向が鉛直方向に近づき、しかも線状体が鉛直姿勢をとる向きに回転した(第2報²⁾の図5参照)。これに対し、助走域では、運動方向が鉛直方向に近づく現象はわずかに生じているが、線状体は鉛直姿勢をとる向きには回転しない。しかも、運動方向が鉛直方向に近づくことも水平方向速度 $\dot{X}$ が急激に減少し、鉛直方向速度 $\dot{Y}$ が増大する傾向を示すことから推察でき

表2 軌跡の変曲点における接線勾配、回転角および移動距離

線状体長さ $l\text{ (mm)}$	流 速 $U\text{ (mm/s)}$	接 線 勾 配		水平方向 移動距離 $X_m\text{ (mm)}$	鉛直方向 移動距離 $Y_m\text{ (mm)}$
		dY/dX	$\theta\text{ (}^\circ\text{)}$		
30	20	1.190	63.2	146.8	334.2
	40	0.871	65.5	208.8	339.9
	60	0.687	66.5	269.9	343.0
	80	0.567	67.1	326.6	345.4
60	60	2.082	14.7	124.0	329.5

図10 軌跡に及ぼす長さの影響 (計算結果)

る程度で、十分に発達した流れ中のように明確には現れない。

これはつぎの原因によると考えられる。線状体がこの領域に入るときの姿勢は、 $l=60$ mm の場合の方が鉛直に近いので、助走域での $\dot{Y}$ の値は $l=60$ mm の場合約 210 mm/s、 $l=30$ mm の場合約 75 mm/s であり、また、 $l=60$ mm の線状体が十分に発達した流れ中で運動する場合 (約 160 mm/s) と比べても大きい。しかも、 $l=60$ mm の場合この領域に入るときの水平方向移動距離は $l=30$ mm の場合より小さいので、境界層は狭く、流速の変化も小さい。したがって、 $l=60$ mm の場合短時間で底面に到達し、角速度は急激に減少し始めるが負にはならない。

4.2 線状体重心の速度

助走域では、壁面に沿って境界層が発達しており、たとえば $U=60$ mm/s の場合、線状体が運動をおこなう位置における管路上面および底面の境界層厚さはそれぞれ約 25 と 30 mm である。よって、流れ方向には流速がゆっくり増加するが、 $25 < Y < 370$ mm の領域では高さ方向には流速はほぼ一様である。したがって、線状体がほぼ一様な流れ中にすべて入るまでの時間は短く (約 0.1 s)、また、姿勢の変化は一樣流れ中の場合とほとんど同じであるので、図11において他の2種類の流れ中の結果と比較すると θ に対する $\dot{X}$ の変化の様子は一樣流れ中の場合によく似ている。なお、 $U=60$ mm/s の場合、 $Y=370$ mm の位置における姿勢は $\theta=66^\circ$ 程度であり、 $\theta > 66^\circ$ で $\dot{X}$ が急激に変化することがわかる。

また、ここで用いた計算条件では流れの発達程度は比較的小さい ($U=20$ mm/s の場合でも最大流速は $u_f^*=1.3$ 程度である)。したがって、境界層内での $\dot{X}$ の急激な加速、減速を除き、同一姿勢に対する助走域の $\dot{X}$ の値は一樣流れ中と十分に発達した流れ中の値の中間の前者に近い値となる。さらに、助走域で線状体が運動する場合にも、静止流体中での水平方向速度を $\dot{X}$ 、線状体重心での流速を W_c とすると

図11 水平方向速度に及ぼす流速の影響 (計算結果)

図12 鉛直方向速度に及ぼす流速の影響 (計算結果)

$$\dot{X} = \dot{X}_c + W_c \dots\dots\dots (11)$$

なる関係で表わされる領域が存在する。この領域は $15^\circ < \theta < 65^\circ$ 程度である。下限値は一樣流れ中の場合とほぼ一致し、線状体が底面近傍の境界層に入るまでの領域で(11)式が成立する。また、上限値は U が小さいほど小さくなる傾向がみられる。なお、慣性のため、急激に加速される領域では $\dot{X} < \dot{X}_c + W_c$ 、減速される場合、 $\dot{X} > \dot{X}_c + W_c$ となる。

一方、助走域では、線状体が底面近傍の境界層内へ入ると、 $l=30$ mm の場合でも線状体が鉛直姿勢をとる向きに回転するため、図12から $\dot{Y}$ が増大する ($U \geq 40$ mm/s のとき) ことがわかる。この場合、同一姿勢に対する $\dot{Y}$ の値は、管路中央部のほぼ一様な流れ中の場合より大きくなる。助走域では U が小さいほど流れの発達程度が大きいことおよび発達程度が大きい流れ中ほど線状体が鉛直方向に加速されにくいことを考慮すると、 U が小さいほど $\dot{Y}$ は大きい。したがって、 $\dot{Y}$ の最大値の流速

による差、たとえば $U=20$ と 80 mm/s の差は、一樣流れ中で 13.5 mm/s であるのに対し助走域では 8.0 mm/s (表 3 参照) と小さくなり、流速の影響も $\theta < 10^\circ$ でみられるに過ぎない (一樣流れ中では $\theta < 15^\circ$)。なお、一樣流れ中の場合と比較すると、 $\theta < 15^\circ$ では $\dot{Y}$ は助走域の場合の方が小さいが、これ以上の領域では両者の θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす曲線が一致することがわかる。しかし、このときの θ の値に及ぼす流速の影響は明確でない。

ここで、3 種類の流れ中における $\dot{Y}$ の変化から、流れの発達程度が大きいくほど、流速分布の影響を大きく受けて、同一姿勢における $\dot{Y}$ の値は運動開始後の θ のより広い領域で一樣流れ中の場合より小さくなる。しかし、 θ の増加に伴い流れ状態は影響しなくなり θ と $\dot{Y}$ の関係は 1 つの曲線で表わされる。

また、表 3 から、 U が大きいほど $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ とともに θ がより大きくなるまで加速される傾向にあるが、 U による差はわずかであることおよびこの θ の値は一樣流れ中の場合 (第 1 報¹⁾、表 3 参照) よりわずかに大きいことがわかる。

つぎに、重心の加速度の変化について調べる。図 13、14 において、他の 2 種類の流れ中の場合と同様 $\ddot{X}$ 、 $\ddot{Y}$ とともに運動開始時から急激に減少する。しかし、減少割合は一樣流れ中の場合よりわずかに小さく、十分に発達した流れ中の場合より大きい。助走域では、線状体は短時間で境界層から抜け出し、ほぼ一樣な流れ中で運動するため、 $\ddot{X}$ の場合 $\theta > 10^\circ$ 、 $\ddot{Y}$ の場合 $\theta > 15^\circ$ では流速の影響は認められず $U=20 \sim 80$ mm/s の曲線は一致する。そして、底面近傍の境界層内へ線状体が入ると $\ddot{X}$ はふたたび急激に減少し、 $\ddot{Y}$ は $l=30$ mm の場合でも急激に増大する。また、十分に発達した流れ中の場合と同様助走域でも、一樣流れ中でみられた $\ddot{X}$ が最小になる現象は生じない。しかし、今より管路高さを大きくすれば $\ddot{X}$ が極小値をもつ。

つぎに、 U を一定として線状体長さを変えた場合の $\ddot{X}$ 、 $\ddot{Y}$ の変化について調べる。

管路上面近傍の境界層の領域が狭いため、 l の大きい線状体の方が流速の小さい領域で運動する時間が長い。

図13 水平方向加速度に及ぼす流速の影響 (計算結果)

図14 鉛直方向加速度に及ぼす流速の影響 (計算結果)

表 3 線状体重心の速度の最大値およびそのときの回転角と落下時間

線状体長さ l (mm)	流 速 U (mm/s)	水平方向速度の最大値			鉛直方向速度の最大値		
		$\dot{X}_{\max}$ (mm/s)	θ (°)	t (s)	$\dot{Y}_{\max}$ (mm/s)	θ (°)	t (s)
30	20	77.88	43.0	1.39	259.5	4.75	0.21
	40	100.58	43.3	1.39	254.3	5.06	0.21
	60	122.76	43.4	1.39	252.4	5.41	0.22
	80	144.69	43.4	1.39	251.5	5.41	0.22
60	60	102.70	14.5	1.37	279.1	5.15	0.29

また、運動開始直後では l の大きい方が線状体の軸方向に沿って分布する流速の差が大きいため、角速度が大きい。したがって、図15、16において、運動開始直後の領域で同一姿勢に対する $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ の値は l の大きい方が小さい。この現象は、 $\dot{X}$ に関しては十分に発達した流れ中でもわずかにみられたが、角速度はつねに l が大きいほど小さいので、 $\dot{Y}$ に関しては生じない。

$l=60$ mm の線状体がほぼ一様な流れ中で運動するようになると、他の2種類の流れ中の場合と同様、同一姿勢に対する $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ の値は l の大きい方が大きくなる。そして、線状体が底面近傍の境界層内へ入ると $\dot{X}$ は急激に減少し、 $\dot{Y}$ が増大する傾向がみられる。これから $l=60$ mm の線状体重心の軌跡が境界層内で鉛直方向に近づくことが推察できる。

4.3 線状体の姿勢

十分に発達した流れ中の場合と同様に、運動開始時に線状体に作用する回転モーメント N は、姿勢を水平に回転させる向きに働く ($N > 0$)。しかし、助走域では境

図15 水平方向加速度に及ぼす長さの影響 (計算結果)

図16 鉛直方向速度に及ぼす長さの影響 (計算結果)

界層厚さおよび流速勾配が小さい。したがって、運動開始直後の角速度 r は、一様流れ中の場合より大きいが多分に発達した流れ中の場合よりは小さくなる。図18からこの領域では U が大きいほど r がわずかではあるが大きいことがわかる。しかし、線状体がほぼ一様な流れ中で運動するようになると r の変化は U に関係なく同一曲線で表わされる。

前項で述べたように、 $15^\circ < \theta < 65^\circ$ では $\dot{X}$ に対し(11)式が成立し、 $\theta > 10^\circ$ で θ と $\dot{Y}$ の関係は U にかかわらず

図17 姿勢に及ぼす流速の影響 (計算結果)

図18 角速度に及ぼす流速の影響 (計算結果)

同一曲線で表わされる。さらに、流れが発達しているのではほぼ一様な流れ中でも dU_z/dt は 0 にならないが、小さい値であるため r の変化にはほとんど寄与しない。したがって、 $15^\circ < \theta < 65^\circ$ の領域では一様流れ中の場合と同様 (第1報¹⁾ の3.4節参照)、流れに対する線状体の相対的な並進運動が流速に関係なくほぼ同じになるので線状体の回転運動も流速の影響をほとんど受けない。なお、この領域の r の変化は一様流れ中の場合とほぼ一致することがわかった。

これは、比較的発達程度の小さい助走域で線状体の運動を計算したために生じたことで、一様流れ中および十分に発達した流れ中の結果を考慮すればわかるように、流れの発達程度が大きくなるにつれて流速の影響は顕著

になる。

このように、流速による r の差はわずかであるので、図17において、姿勢の変化には流速の影響がほとんど認められない。

3種類の流れ中の結果から、流れの発達程度が大きいほど、 r の変化に U の影響が現われる θ の領域が広くなり、一様流れ中の場合との差も大きくなる。さらに、発達程度が同じであれば U が大きいほど一様流れ中の場合との差が大きいことがわかる。そして、助走域では、 U が小さいほど流れの発達程度が大きくなるため、 U が r の変化に及ぼす影響が小さくなったと考えられる。

つぎに、長さの影響を表わす図19から、 $\theta < 3^\circ$ では $l = 60$ mmの線状体の方が r は大きく、この現象は他の2種類の流れ中ではみられなかった。したがって、この

図19 角速度に及ぼす長さの影響 (計算結果)

現象には境界層厚さ、初期位置と線状体長さの3者が関係していると考えられる。

5. 計算結果と実験結果の比較

線状体の落下実験では、流れをできるだけ乱さないように線状体落下装置を管路上面に隣接して取付けている。このため、線状体が流れ中に入るとき急激に流れの向きに回転し、線状体全長が流れ中に入ったとき、線状体は鉛直方向に対しかなり傾いており、しかも大きな速度と角速度をもっている。そこで、線状体全長が流れ中に入ったとき最初に撮影された線状体の運動状態を初期条件として計算をおこない、その結果と実験結果を比較することにした。

数値計算は $d = 0.569$ mm, $l = 30, 60$ mmのNo. 1試料

に対し $U = 60$ mm/sで表4に示す初期条件を用いておこなった。ここでは、流速および線状体長さが運動特性に及ぼす影響に関して計算結果と実験結果を比較し、ここで用いた理論が流れ中での線状体の運動を予測するのに妥当であるかどうかを検討する。

図20において、線状体は $\Delta t = 0.2$ sごと(計算結果)および $\Delta t = 1/3$ sごと(実験結果)に記載してある。 $l = 60$ mmの場合、実験結果と計算結果はよく一致して

図20 軌跡に及ぼす長さの影響

いる。しかし、 l が小さくなると同一の Y に対する X の値は計算結果の方が大きく、重心の軌跡にかなりの差が認められる。なお、同一の Y に対する X の値は、 l の小さい線状体の方が大きいことおよび同一姿勢に対する X, Y の値は、 l の大きい線状体の方が大きくなることなど、長さが軌跡に及ぼす影響は実験結果と計算結果で一致する。

重心の速度の変化に及ぼす線状体長さの影響を表わす図21, 22には、初期条件の影響も調べるため、実験結果、表4の初期条件の場合の計算結果(太線)および $\theta_0 = 1^\circ$ の場合の計算結果(細線、図15, 16中の曲線)が併記してある。

計算結果から、初期条件が異なると、運動開始直後の小さい領域では差が認められるが、その後は θ と $\dot{X}$ および θ と $\dot{Y}$ の関係には初期条件は影響を及ぼさないことがわかる。

実験結果には、 $\dot{Y}$ に l の影響がもっとも顕著に現われる θ の小さい領域でのデータがないため、 l の影響はみられない。また、 $\dot{X}$ に関しては計算結果からわかるように、 l による差はわずかであるので実験では明確に現われなかったと考えられる。 θ の増加に伴い $\dot{X}, \dot{Y}$ に l が

表4 初期条件

線状体長さ l (mm)	初 期 位 置		初 速 度		初期回転角 θ_0 (°)	初期角速度 r_0 (rad/s)
	X_0 (mm)	Y_0 (mm)	u_{0x} (mm/s)	v_0 (mm/s)		
30	8.0	-20.0	34.6	-208.1	22	0.6
60	20.0	-45.0	35.6	-208.6	21	0.15

図21 水平方向速度に及ぼす長さの影響

図22 鉛直方向速度に及ぼす長さの影響

影響しなくなることは、計算結果から直接にはわかりにくい、助走域と一様流れ中の計算結果の比較から推察できる。

姿勢の変化に及ぼす流速および線状体長さの影響を表わす図23には、実験結果との比較を容易にするため、横軸（落下時間 t 軸）に沿って平行移動した後の計算結果が記載してある。

計算結果と実験結果は、 $l=60$ mm の場合良く一致しているが、 $l=30$ mm の場合、同一姿勢に対する角速度 $d\theta/dt$ の値は計算結果の方が小さくなる。しかし、 l が

図23 姿勢に及ぼす流速の影響

小さいほど線状体が回転するのに要する時間が短いことは実験と計算の両方で確かめられた。また、実験では、 U は姿勢の変化にほとんど影響を及ぼさず、助走域における姿勢の変化は静止流体中の場合とほぼ同じになるという結果が得られた。

実験とは初期条件が異なるが、図17に示した計算結果からも境界層外の領域では U は姿勢の変化に影響しないことが明らかになっている。

さらに、図23では初期回転角、初速度および初期角速度が大きいため、計算結果、実験結果ともに運動開始直後に l が大きい線状体の方が角速度が大きくなる現象および底面近傍の境界層内で姿勢が鉛直に回転する現象（図19参照）は認められなかった。

ここで、実験結果と計算結果で差が生ずる原因について考察する。原因としては、

- ① 回転運動している線状体の回りの流れに対し独立の原理が適用できると仮定して抗力を計算した。
- ② 抗力係数 C_d （第1報¹⁾の⑥式）として定常一様流れ中における無限長円柱に対する値を使用した。
したがって、線状体の軸に直角に働く抗力は、 l/d の大きい線状体の方が精度よく計算できる。
- ③ 線状体の軸方向の摩擦抗力を求めるには、プラントル数 $Pr=1$ の場合のヌセルト数 Nu とレイノルズ数 Re の関係が必要であるが、ここでは、 $Pr=0.71$ に対する実験式（第1報¹⁾の⑧式）を用いた。

- ④ 図5で示したように、矩形管路高さ方向の流速分布は計算値と測定値でかなりの差がある。

などが考えられる。

ここで流速分布の計算に用いた Han の方法は他の報告⁴⁾でも測定結果と良く一致することが確認されているので、④の項目に関しては流速測定の精度に問題があったと考えられる。したがって、精度の良い流速測定ができれば、線状体が運動をおこなう領域での流れの発達程度が Han の方法により高い精度で予測でき、線状体の運動に関する実験結果と計算結果の一致は良好になる。

なお、線状体の運動を計算する際、線状体が存在するため、流速分布に影響を及ぼすので、流速分布を先に決めるのは問題であるという指摘がある。確かに、数多くの線状体が管内で運動する場合、当然線状体の存在が流れ場に影響を及ぼす。しかし、線状体が単一で運動する場合、管路の大きさに比べて線状体の大きさは極めて小さく流速分布への影響は無視しても差し支えない。

以上のように、流速および線状体長さが助走域での運動特性に及ぼす影響は実験結果と計算結果で一致する。よって、ここで用いた理論により流れ中での線状体の運動をかなりの精度で予測することができるはずである。

6. 結 言

第1報¹⁾で導いた線状体の運動方程式を水平な矩形管内の助走域での運動に適用した。そして、水平な一様流れ中、十分に発達した水平流れ中の計算結果と比較しながら、流速と線状体長さが線状体の運動特性に及ぼす影響を調べた。また、あわせておこなった線状体の落下実験から得られた結果と計算結果を比較し、この理論が流れ中での線状体の運動を予測するのに妥当であるかどうかを検討した。得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 助走域の流れは、一様流れから十分に発達した流れへ移行する途中の段階であるので、助走域での重心の軌跡は両者の軌跡を合わせたような形になる。また、軌跡に及ぼす U の影響も両者の中間的なものになる。さらに、 $l=30\text{ mm}$ の線状体は管路底面近傍の境界層内で鉛直姿勢をとる向きに回転し、 $l=60\text{ mm}$ の場合鉛直には回転しない。この結果は、十分に発達した流れ中の結果と逆であるが、これは管路高さとの関連に

よるものである。

- (2) 姿勢の変化に対する重心の速度および角速度の変化も、一様流れ中と十分に発達した流れ中での変化の中間に位置する。また、 U により流れの発達程度が異なり、その影響が U の影響に含まれるため、助走域では他の2種類の流れの場合より U の影響が現われにくい。今回の計算に用いた助走域は比較的発達程度が小さいため、運動開始直後の領域で l の大きい線状体の角速度が大きくなる現象がみられた。
- (3) 助走域での運動特性および流速、長さの影響は実験結果と計算結果で一致する。したがって、ここで用いた理論により流れ中の線状体の運動をかなりの精度で予測することができるはずである。

参考文献

- 1) 堀川, 千葉; 織機論文集, **36**, T79 (1983)
- 2) 同上, **36**, T89 (1983)
- 3) L. S. Han; J. Appl. Mech., **27**, 403 (1960)
- 4) E. M. Sparrow, C. W. Hixon, G. Shavit; J. Basic Engng., **89**, 116 (1967)
- 5) 堀川, 千葉, 西谷, 上島; 織機論文集, **33**, T118 (1980)