

Linear—high—polymer 稀溶液の乱流境界層の発達

東京工業大学 工学部 日 野 幹 雄

”

○長谷川佐代子

要旨 : ある種の高分子稀溶液が、種々の流体力学的に奇妙な特性を示すことが注目されている。特に乱流域での著しい摩擦抵抗の減少——いわゆる Toms 効果が最も広く研究されている。しかし、管内一様流の場合の研究がほとんどである。ここでは、開水路中の乱流境界層の発達と流速分布を PEO (ポリエチレンオキサイド) 稀溶液の場合と水の場合とについて実験し比較した結果について報告する。

1. はじめに

ある種の高分子(鎖状分子構造の高分子)の稀溶液は、密度・粘性など物性的には普通の水と同じでも、流体力学的には水と著しく異なることが最近注目されている。特に、1948年に Toms により発見された乱流域での摩擦抵抗の減少(いわゆる Toms 効果)は最も実用的利用度の高いものとして工学の各分野において研究されている。

この他のポリマー効果には、表-1に示すような現象が報告されている。このようなポリマー稀溶液の流力的異常現象は単に実用上の面からのみでなく、流体力学の基礎問題として取り上げられて来ている。すなわち、現在の流体力学の考え方に対する新たなチェック・ポイントなのである。

さて、多くの研究者は、ポリマー効果は乱流域において生じるという風に考えているが、必ずしもそうではなく、気中噴流の分散や Taylor 渦の発生の抑制効果のように、層流から乱流への遷移域に見られるものもある。また、球の抵抗の減少も、球の Reynolds 数は 10^4 オーダーあるいはそれ以上の場合であって、球の後の後流は乱流であるけれども、球に沿う境界層は層流であって、球の形の抵抗

表 — 1 : 高分子稀溶液にみられる異常現象

	層流・遷移域	乱流域
流体抵抗		摩擦抵抗の減少 (Toms 効果) 形の抵抗 (球の抵抗) の減少
流力安定	気中噴流の分散の抑制 円軸回転二重円筒内の流れ (Taylor vortex)	
混 合		液中噴流

の減少というポリマー効果は、むしろこの層流境界層の剝離点の下流への移動と解釈されるものである。Toms 効果にしても、最近では壁に沿う・粘性底層・(viscous sublayer) の厚さの増加ではないかとの見方が強い。こうみてくると、ポリマー効果は乱流域そのものの現象というよりは、むしろ層流遷移域での異常現象のように見える。

Toms 効果、より一般的にはポリマー効果を説明する説は数多く提出されている。(これについては前報を参照されたい。) 著者達は、ポリマーの・補強効果・(reinforcement effect) という考えを提出した。これは、ポリマーが強い剪断力の場におかれると、その方向(正しくはこれとある傾きの方向)に引き伸ばされて長く延び、このため流体はこの方向にいわば補強され、外部からの攪乱エネルギーを吸収し、攪乱に対する層流安定性を高めることになると思われる。

著者達は、この考え方を確めるために種々の実験を重ねて来たが、今回は開水路におけるポリマー稀溶液の乱流境界層の発達と流速分布について実験を行った。

II 実験装置

水路 : 実験水路は幅 20 cm 深さ 20 cm 長さ 3 m の環流式のものである。ポリマーは、高温・塩素・鉄イオンに対して化学的に不安定であるので、水路はプラスチック製、パイプは塩化ビニール管とし、上下流の水槽には十分の錆止めをほどこした。夏場の実験中はビニール袋に氷を包んで下水槽につけ、水温があまり高くないようにした。

トリップ・ワイヤ : 水路底より発達する境界層を乱流境界層とするために、水路上流端の水路底面にトリップ・ワイヤとして直径 1 mm の針金を流れに直角に取り付けた。

ポリマー : linear-high-polymer としては PEO(polyethylen oxide, 商品名 アルコックス E-130, 明成化学製)を用いた。化学的安定性を増すための安定剤(サンデックス O)を使用した。また、実験はポリマー濃度は 50 ppm の場合についてのみ行った。

測定 : 流速の測定には、普通のピトー管を用いた。水の場合に較べて、マノメーター指示が時々不整となるので注意が必要であった。また、上水槽に三角堰をつけた場合、落下水により水路上流部に泡が沢山できるので、大部分の実験は上水槽底から水路へ直接導水して行った。

III 実験結果

流速分布 1) 対数分布 — ポリマー溶液の流速は 図 — 1 に示すように、きれいに対数分布則にのっている。境界層内の流速分布の(直)線とその外側の線との交点の位置の水路底面からの高さを 境界層の厚さ δ と定義する。流速分布を無次元化して

$$\frac{u(y)}{U_0} \text{ vs } \frac{y}{\delta}$$

の形に図示したのが 図 — 2 a) b) である。

流速分布は 図 — 2 にみられるように、水の場合にもポリマーの場合にも 対数分布則

$$\frac{u(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + Ar$$

あるいは velocity defect law の形にして

$$\frac{U_0 - u(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta}$$

の分布に良く従っている。

流速分布の勾配 U_*/κ は ポリマー液の方がややきつくなっている。われわれの実験では、下流の等流状態での $U_* = \sqrt{ghI}$ (h : 等流水深, I : 水路勾配) を同一の状態にして実験を行ったが、これは必ずしも境界層の発達過程での U_* が同一であることを意味しない。

2) 指数分布 : 流速分布を指数則

$$\frac{u(y)}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/n}$$

の形で整理したのが、図-3 である。これより

$$1/n = 1/6.6 \quad (\text{水の場合})$$

$$1/n = 1/5.3 \quad (\text{ポリマー 50 ppm の場合})$$

となり、両者にかなりの差が表われる。この実験のレイノルズ数範囲は

$$Re = 2.12 \times 10^4 \quad (\text{水の場合})$$

$$Re = 2.02 \sim 2.45 \times 10^4 \quad (\text{ポリマー 50 ppm の場合})$$

であるから、指数 n の差はレイノルズ数の差によるというよりも、むしろもっと直接的に 流れの内部構造の違いを示すものである。

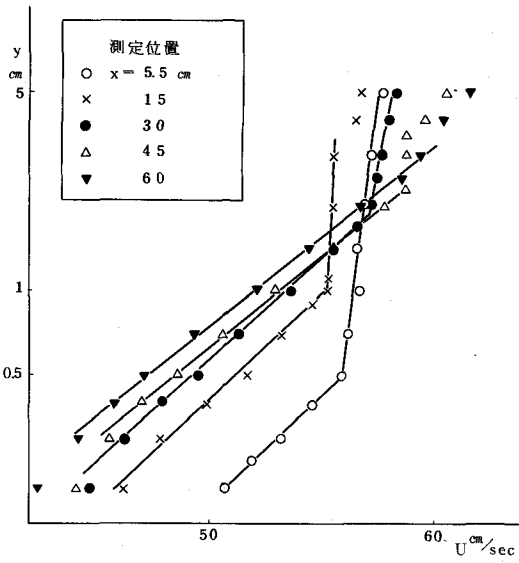
境界層の発達 : 図-1 a) b) に示すように、水の場合は境界層の外側の流れがほとんど加速されることなく、 $x = 60 \text{ cm}$ で境界層はほぼ自由表面に達している。

これに反し、ポリマー液の場合には、水路上流 $x = 5.5 \text{ cm}$ のところでは、水の場合よりも大きい境界層厚を持っている——これがどのような過程で生じるかはわからない——にもかかわらず境界層厚の発達は非常に遅く、また境界層外側の流れの加速も大きい。この場合、厳密には Delleur や岩佐のように自由表面と境界層との相互作用を考慮して、境界層の発達を論じなければならない。しかし、一応その効果を消略して、 δ と x の関係を Karman の運動量方程式から求めると

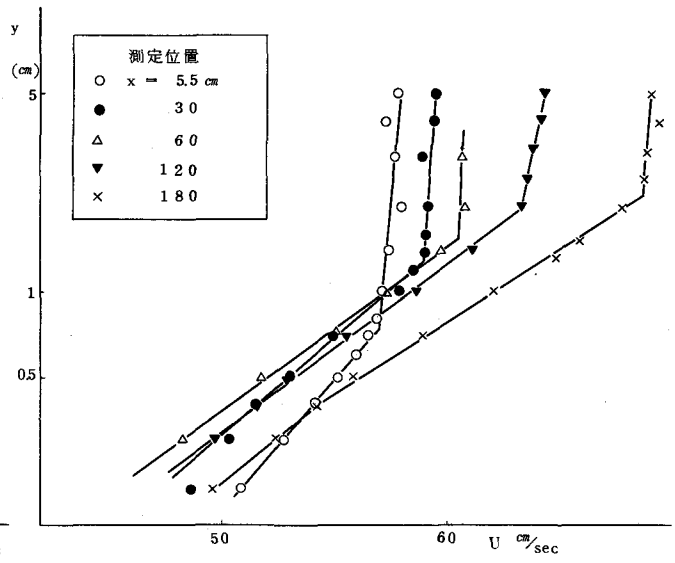
$$\delta(x) = \text{const} \times x \left(\frac{U_0 x}{\nu} \right)^{2/(n+3)}$$

であり、水の場合には $\delta \propto x^{3/4}$ であって上式と良く合っている。しかるに、ポリマー液の場合には全く合わない。

著者らは、この理由を境界層の外縁部——いわゆる SUPER LAYER——における新しいポリマー効果のためではないかと考えて実験的検討を重ねている。

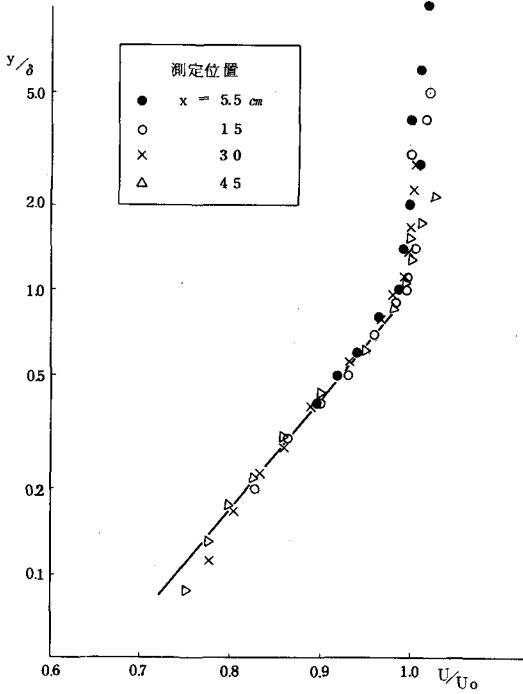


a) 水の場合

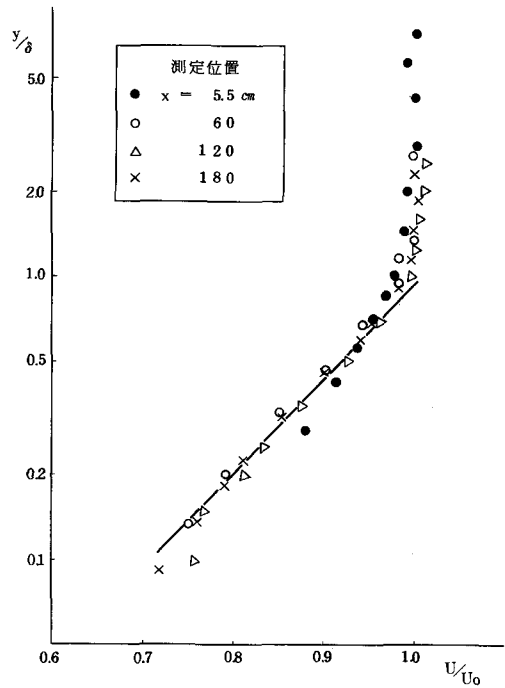


b) ポリマー (50 rpm) の場合

図-1: 流速分布——境界層の発達



a) 水の場合



b) ポリマーの場合

図-2: 流速分布の無次元表示 (1)

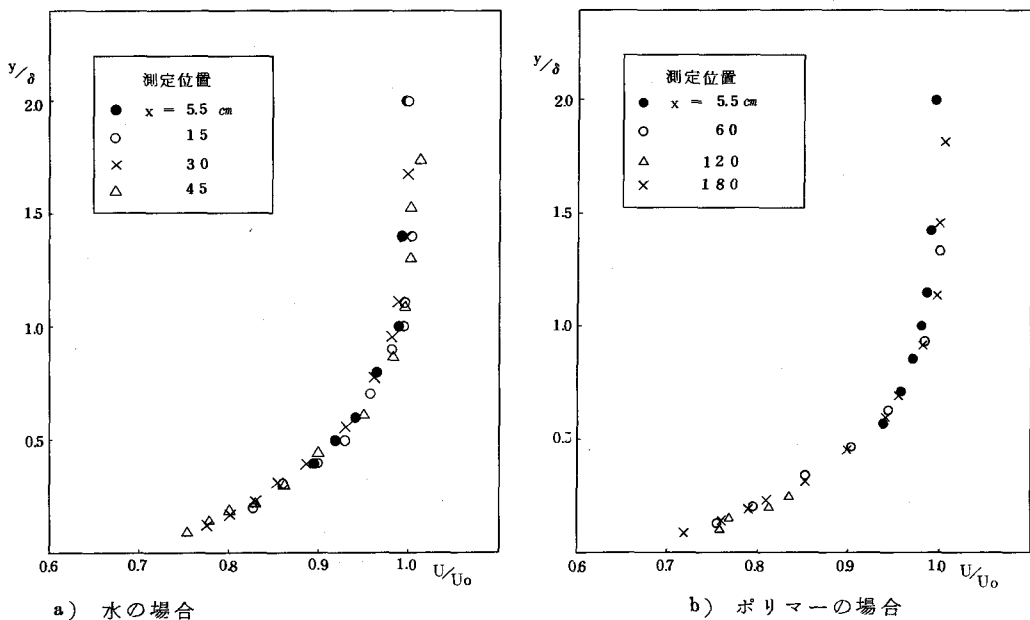


図-3： 流速分布無次元表示 (2)

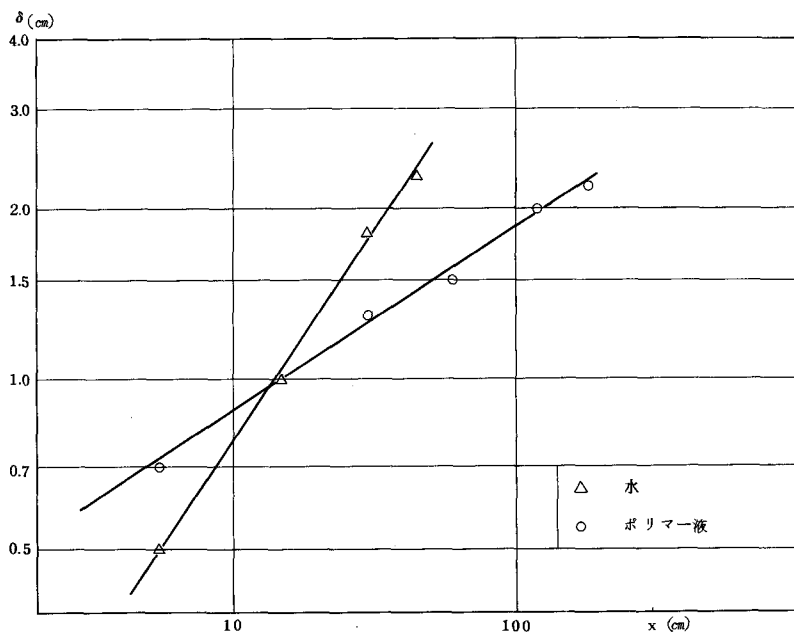


図-4： 境界層の発達

参 考 文 献

- 1) Toms, B.A.: Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straght Tubes at Large Reynolds Numbers, Proc.1st Int. Congress on Rheology.
- 2) 日野, 長谷川: ポリマー稀溶液に関する流体力学的な二, 三の実験, 第13回水理講演会講演集, (1969)
- 3) Delleur, J.W.: The Boundary Layer Development in Open Channels, Proc. ASCE, J.Eng. Mech.Div. Proc.Paper 1138, January, (1957).
- 4) Iwasa Y.: Discussion on "The Boundary Layer Development in Open Channels" by Delleur Proc. ASCE., J.Eng.Mech.Div., Discus.1520-3, January, (1958)
- 5) Schlichting: Bandary Layer Theory, Mc Graw Hill, (1967)