

ポリマー稀溶液に関する流体力学的な二、三の実験

東京工業大学工務部 正員 長谷川 佐代子

同上 " " 日 野 幹 雄

要旨：最近ハイポリマー稀溶液の奇妙な性質——特に滑らかな管路の乱流域でみられる著しい摩擦抵抗の減少効果（Toms 効果）は、実用の面からのみでなく、流体力学の基礎問題として多くの分野の研究者の興味を刺激している。

本報告は、落下球・気中噴流・粗面水路流においてもポリマー効果が現れること、とりわけポリマー効果が層流域・遷移域にもみられることを実験により示した。

1) これまでの種々のポリマー効果に関する実験

水あるいは他の媒質に、分子量の非常に大きい分子構造が線型の高分子（linear high polymer）をほんの少し混入すると、管路の摩擦損失が著しく減少すること；この傾向はあるポリマー濃度で最大となり、それ以上の濃度ではむしろ摩擦抵抗係数は増加の傾向になること；この効果は滑らかな管路の乱流域で生ずることが Toms¹⁾ (1948) により発見され、Toms 効果と呼ばれている。

Toms 効果は、船舶の抵抗損失の減少・都市建築の高層化にともなう消火作業・屋外式変電所ガインの塩害防止・生体の高血圧降下などの実用面から研究される一方、乱流とその発生機構をさぐる手掛りあるいはこれまでの理論のテストという流体力学の基礎問題としても重視されて来ている。

ポリマー効果に関する実験としては、この他に管路流の流速分布や乱れの測定（Ernst²⁾ 1967, Virks et al³⁾ 1966, Virks et al⁴⁾ 1967), 噴流（Gadd⁵⁾ 1965, White⁶⁾ 1967), 曳行格子の後の乱れの測定（Fabula⁷⁾ 1965), 共軸回転円筒間の流れ——Taylor 渦（Rubin & Elata⁸⁾ 1966）および落下球（White⁹⁾ 1966, Sanders¹⁰⁾ 1967, 長谷川・日野¹¹⁾ 1968）などが報告されている。

一方、ポリマー効果の発生のメカニズムについては、次のような考えが提案されて来た。まず、土砂流などの場合のように乱流中のポリマーが乱れを減衰させるという考えで、これを管路流について定式化したものに富田¹²⁾の理論（1966）がある。また、コイル状あるいは毛糸玉状になりやすいポリマー分子の性質が Toms 効果を生むとする説、乱れの渦径と高分子の有効直径が一定比になって Toms 効果が開始するとする仮説（Virks³⁾ 1966）、粘性率の非等方性、管壁における effective slip という考え方などがある。

- 1) Toms, B.A.: Proc. 1st Int. Congress on Rheology, 2) Ernst, W.D.: AIAA, J. vol. 5, 906, 3) Virks, P.S. et al.: Modern Developments in the Mech. of Continua, Acad. Press, 4) Virks, P.S. et al.: J. Fluid Mech. Vol. 30, 305, 5) Gadd, G.E.: Nature, No. 4983, 463, 6) White, D.A.: J. Fluid Mech., vol. 28, 195,, 7) Fabula, A.G.: 6th Naval Hydrodynamics Symposium, 8) Rubin, H. & Elata, C.: Phy. Fluid, vol. 9, 1929, 9) White, D.A.: Nature No. 5059, 277, 10) Sanders, J.V.: Int. Shipbuilding Progress, 11) 長谷川・日野, 第23回土木学会学術講演会集Ⅱ, 12) 富田; 機械学会論文集 No. 234

2) 落下球の実験

落下球のまわりの流れには2種の異なる流れの様式がある。すなわち、球体の浸み点から発達する境界層と剝離の現象、もう一つは境界層の剝離後の後流である。(一般に、球や円柱の抵抗係数は境界層の剝離点の位置によって定まる。剝離点が後にずれるほど後流の幅が小さくなり、形の抵抗は減少する。)このような2種の流れの様式が共存するゆえに、落下球によるポリマー効果の実験は、ポリマー効果のなぞを解明する上で、種々の手掛りが与えられるのではないかと予測のもとに次のような方法で実験を行った。

落下球の実験に用いた水槽は、高さ100 cm、断面が33 cm × 33 cmの透明プラスチック製のものである。水槽底面の下にマルチ・ストロボ放光源を置き、水槽の壁面の内側にはカメラに対する面を除き黒布をはり壁面よりの反射光を除外するようにした。落下球としては、鋼球・ナイロン製球それぞれ数種、それに内部に四塩化炭素をつめて重さを調節したビンボン球を用いた(表-1)。球には、蛍光塗料あるいはアルミ粉末を塗ってストロボの閃光の反射能を高めるようにした。球の落下状態はカメラ(ニコン F T)を開放状態のままストロボを発光させてフィルム上に記録した。球の落下距離は蛍光塗料で目盛りをしるした物指を水槽中に入れて球と同時に写すようにして決めた。

ハイ・ポリマーとしては Polyethylene Oxide (商品名 アルコックス E-130 明成化学製)を使用した。酸・塩素イオン・鉄イオンに対するポリマーの化学的安定性を良くするためにサンデックス O (明成化学製)

材 質	ナ イ ロ ン				ス チ ール				ガラス	セルロイド (CCl ₄ 入)
密 度 $\frac{g}{cm^3}$	1.12				7.76				2.48	1.69
直 径 mm	9.7	12.8	15.9	22.4	9.7	12.8	15.9	22.3	12.7	37.0

表-1 : 実験に使用した球の材質・直径・重量

を混入した。ポリマー濃度は50, 100, 150 ppm の3種とした。濃度がきわめて低いので、比重・粘性(オストワルド型粘度計により測定)などの物理的な性質は、媒質である水とほとんど変わらなかった。

実験は次のような3項目について行った。

a) 落下球よりの渦の発生

写真1 a は水中での落下球(四塩化炭素をつめて重くしたビンボン球)の落下状態の一例である。渦の発生離脱のため球は左右にかなり大きく揺れている。ところが100 ppm というき

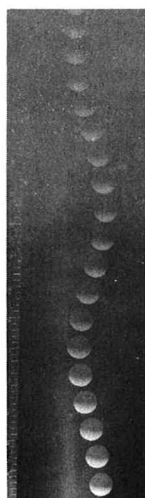


写真-1 a : 水中を落下するビンボン球の振動,
 $Re = 2.80 \times 10^4$

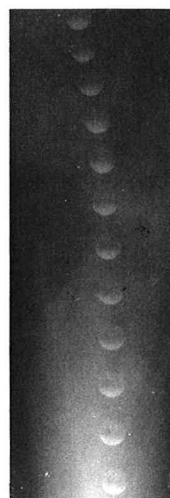


写真-1 b : ポリマー稀溶液(濃度 100 ppm)中を落下する左の写真と同一のビンボン球,
 $Re = 3.63 \times 10^4$

わめて稀いポリマー溶液中では写真 1 b にみられるように振動が大幅に押えられている。他のナイロン球についても同様である。

写真は一方からのみしか撮られていないので、振幅を求めることには無理があるが、落下球の振動を特徴づける無次元数 Strouhal 数

$$S = f D / U$$

(ここに、 f : 振動周期、 D : 球の直径、 U : 落下速度) を求めてみると、表 - 2 のように S は多少増加の傾向をみせている。

渦による球体の振動は物体背後に生じる渦の液体力学的不安定によるものであり、 $Reynolds$ 数が 10^5 以下では球に沿う境界層は層流剝離ののち後流となる。写真 - 1 a, b や表 - 2 の結果は、したがってポリマー効果が層流域あるいは層流から乱流への遷移域においても現れることを示唆するものである。

b) 滑らかな球の抵抗係数の減少

a) と同様にして記録されたフィルムから、球の落下速度を算出し、十分最終速度に達したナイロン球の場合には、次式により抵抗係数 C_D を求めた。

$$C_D = \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \frac{Dg}{U^2}$$

ここに、 U : 落下速度、 σ : 球の密度、 ρ : 溶液の密度、 g : 重力の加速度である。

また、鋼球の場合には水槽の高さが十分でなく、記録された落下状態は最終速度に達していないので、抵抗係数 C_D は次式から求めた。

$$C_D = \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \frac{Dg}{U^2} \times \left(\frac{e^{2akt} - 1}{e^{2akt} + 1} \right)^2$$

$$a^2 = \frac{\sigma/\rho - 1}{\sigma/\rho + \frac{1}{2}} \cdot g$$

$$k^2 = \frac{C_D}{D \left(\sigma/\rho + \frac{1}{2} \right)}$$

t : 球の落下時間。

実験から求められた C_D と Re との関係を図示すれば図 - 1 のようになる。

まず、水中での $C_D \sim Re$ の関係をみると風洞中での静止球から得られた実験曲線に比較して、鋼球の実験値 C_D はいくら

球の直径 mm	Strouhal 数 (Reynolds 数)			
	水	ポリマー 50ppm	ポリマー 100ppm	ポリマー 150ppm
9.7	0.0322 (2210)	0.0460 (2100)	0.0640 (1540)	0.0543 (1800)
12.8	0.0421 (2930)	0.0487 (3060)	0.0631 (2440)	0.0576 (2670)
15.9	— (4500)	0.0451 (4470)	0.0570 (3760)	0.0506 (3950)
22.4	0.0498 (6970)	0.0391 (7130)	— (6260)	0.0528 (6180)

表 - 2 : ポリマー稀溶液による落下球の Strouhal 数の減少 (ナイロン球の場合)

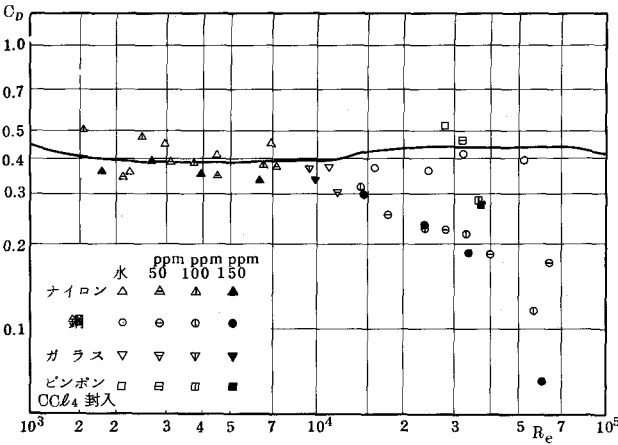


図 - 1 : 落下球 (滑らかな球) におけるポリマー効果、 C_D と Re の関係

が小さくなっているが、ナイロン球に関する実験値は図中の曲線より大きな C_D 値となっている。これは、鋼球の場合には重心まわりの2次モーメントが大きく、落下中の振動は全くみられないのに反し、ナイロン球・ビンボン球ではすでにa)で述べたように渦による振動が大きいのである。

ポリマーの稀溶液中では予想通り、抵抗係数 C_D が減少している。減少の程度は R_e の大きい鋼球の方が著しい。

種々の実験事実からポリマー効果についていろいろな解釈がなされているが、われわれは次のように考える。

“線型の長い高分子が強いシアの場合におかれると分子はその方向に配列するようになり、媒質はポリマーの方向にすすむ攪乱のエネルギーを吸収しやすくなる。ポリマーが攪乱のエネルギーを吸収する割合は、攪乱あるいは流れの変化がポリマーに固有な時間スケール (relaxation time) より早く起っている度合による。”われわれはこのようなポリマーの効果に関するモデルを **補強効果 (reinforcement effect)** と呼ぼう。

球に沿う境界層内の流れでは、特徴的な流速は落下速度 U 、特徴的な長さは剝離点直前の境界層厚さ δ であるから、現象の特徴的な時間スケール t を $t_h = \delta/U$ により定義できる。一方、境界層厚さ δ は、 R_e の関数 $\delta = D f^n(R_e)$ であるが、境界層理論によれば $f^n(R_e) = R_e^{-m} = R_e^{-1/2}$ である。しかし、最近のDimopoulos & Hanratty (1968)の実験(球面の剪断力と R_e の関係)によれば R_e が60~360の範囲で m は1/2よりも大きくなっている。われわれの実験範囲である $R_e = O(10^3 \sim 10^4)$ では、 m はさらに1/2より大きいであろう。実験結果を整理して m を求めると、落下球の時間スケールとして、次のようにとれば良いことがわかる。

$$t_h = D / (UR^2)$$

図-2は、このような考えにもとづいて、ポリマー効果 $(1 - C_D/C_{D0})$ と t_h との関係にわれわれの

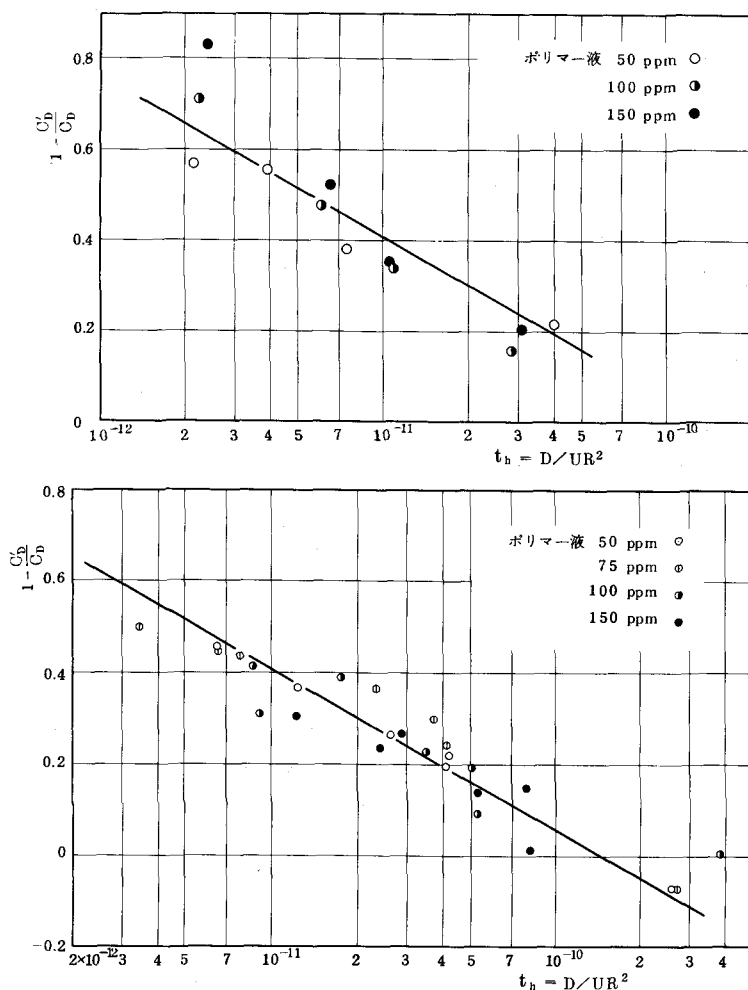


図-2：落下球におけるポリマー効果とTime scale ($D/(UR^2)$)の関係

実験結果を整理したもので、球の直径・ポリマー濃度には無関係に一本の曲線の上に乗っている。

(C_D' はポリマー液中の球の抵抗係数) しかも、われわれのポリマー効果の仮説から当然のことながら、 t_h がある限界値 relaxation time t_* を超える際にポリマー効果が現れ、この t_* の値はポリマーの種類毎に固有のものであって、ポリマーの濃度には無関係である。

ポリマー溶液中の落下球の実験は White (1966) によっても行われている。彼の実験結果を再整理して図示すれば、図-2 の下図のようになる。White の実験に用いられたポリマーは P301 Polyox でわれわれのものと同種のものであるため、2つの実験はかなり良く一致している。

c) 粗球の抵抗係数変化

球の表面に砂粒子 (径 0.28mm) をはりつけた粗球についての落下実験から、ポリマー効果を調べてみた。水中の場合、粗球では境界層の剝離・遷移が促される結果抵抗係数は滑球に較べて図-3 のように変わってくる。これは、滑球に対する $C_D \sim R_e$ 曲線を R_e の低い方に移したような傾向をもっている。

ポリマー溶液の場合には、 C_D は $R_e = 4.66 \times 10^4$ を除けばやはり水の場合より C_D の値が少なくなっている。そして、 $R_e = 4.66 \times 10^4$ の点では逆に水中での C_D より大きくなっている。これは、ポリマー溶液中では C_D が減るというよりも球の表面に沿う流れの状態が滑球の状態に近づくという様に考えれば納得がゆく。

3) 気中噴流

これまでは Toms 効果が乱流域で現われることもあって、噴流に関するポリマー効果の実験ももっぱら乱流噴流について行われて来た。例えば、Gadd (1965) は水中へのポリマー噴流の実験から、ポリマーは噴流中の微小な渦を減衰させることを示したし、White (1967) はポリマー噴流では噴流の広がり幅が大きくなることを示した。

著者達のポリマー効果に対する考え

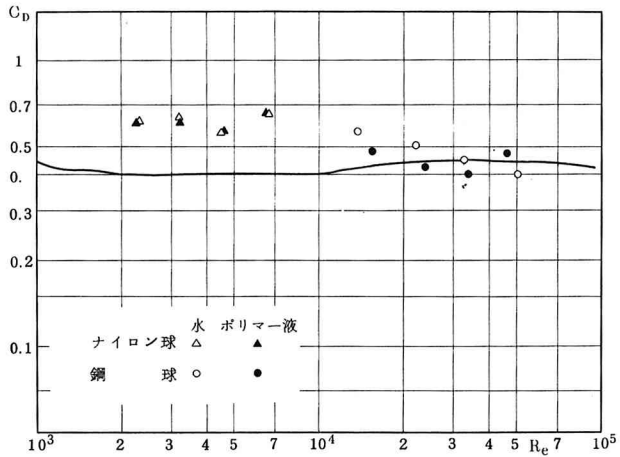


図-3：粗球の抵抗係数に対するポリマー効果

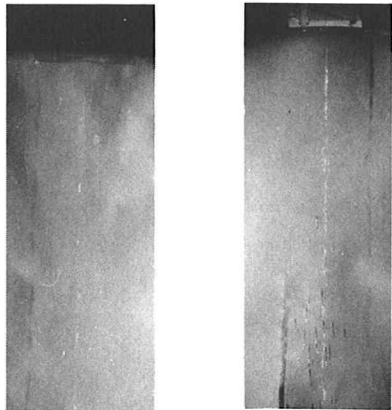


写真-2：気中噴流の分散 (左) 水束の噴流, (右) ポリマー溶液の噴流 (ポリマー濃度は 50 ppm)

は、ポリマー効果は必ずしも乱流域に特徴的であるのではなく、むしろ層流から乱流への遷移域において流体现象に影響を与えているというのである。したがって、この遷移域の現象が明確にあらわれる気中噴流を取り上げた。

・噴出口からの液束の表面には攪乱の不安定増幅のために

Rayleigh 波あるいは Weber 波

が発達し、これらが増幅して噴

流は分裂分散するに到る。実験装置はきわめて簡単なもので、上部の定水槽からビニール管を通して液束を落下させる。噴出口の径は 0.2 cm と 0.5 cm の 2 種類とし、落差は 100 cm とした。

写真-2 (左) は気中の落下水束の分散、写真-2 (右) はこれと同一条件のもとでの落下ポリマー稀溶液の分散の写真である。(黒線は照明による水束の影である) これらの写真からポリマー溶液では噴出口から水束の分散までの落下距離が長くなっていること、つまり外部からの攪乱に対する液束の安定性が增大していることが明らかである。これらの写真では、液流の表面波が明確でないので、装置に多少の改良を加えて、Rayleigh 波が写真に見えるようにした。結果は講演時に発表。

4) 粗面水路流に対するポリマー効果

滑面管路のポリマー稀溶液の著しい抵抗損失の減少の原因について種々の議論がなされて来た。しかし、最近では流速分布の測定から、ポリマー稀溶液では流速分布の対数則

$$U(y)/U_* = 1/\kappa \cdot \ln(U_* y/\nu) + As$$

における定数 As が増加しており、Karman const は土砂流や粒子流の場合と異り変化がないことが明らかにされ；その結果ポリマーは壁面に沿う粘性底層あるいは Couette flow の流体力学的な安定性を増加させるものという意見が多くなって来た。

それならば、粗面上のポリマー稀溶液の流れでは、流速分布や抵抗係数はどうなるのであろうかという疑問が生じる。このため、幅 20 cm 長さ 3 m の環流式の開水路で実験を行った。その結果の一例が図-4 である。ポリマー濃度は 50 ppm、水深と勾配を水量・ポリマー稀溶液流について同じくとった。

これまでの滑面管路の実験に照して、粗面水路流ではポリマー効果が現れないのではないかとこのわれわれの予想を完全に裏切って、同一水深同一勾配に対してポリマー流の流量はかなり減少している。つまり、滑面管路の場合とは逆に摩擦損失係数は増加している。

謝辞：この実験の後期において来日中の Johns Hopkins Univ. Kovasznay 教授と工大・機械工学科の森教授より、実験結果および著者の reinforcement effect の考えについて有益なる御討論をいただいた。実験方法については、工大 吉川教授、椎貝助教授より種々の助言を受けた。ここにこれらの方々に謝意を表します。

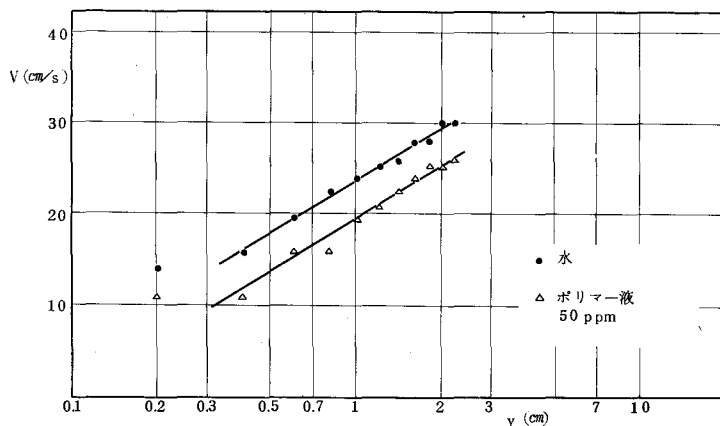


図-4：粗面水路の開水路流に対するポリマー効果