管内流動に与える壁面コーティング層の影響*

中 村 雅 英^{*1}, 杉 山 渉^{*2}Effect of the Coating Layer on the Apparent Viscosity
in a Pipe Flow

Masahide NAKAMURA and Wataru SUGIYAMA

The effect of a coating layer on the apparent viscosity of water in a tube is evaluated experimentally over a wide range of Reynolds-numbers (200-2 000). In this study, a gelatin-coated glass tube, a paraffin-coated glass tube and a glass tube without a coating are used. The conclusions are summarized as follows: 1) At a low Reynolds-number region (20-500), the gelatin layer has the effect of decreasing the apparent viscosity by about 4 %, but the paraffin layer does not have an effect on the apparent viscosity. 2) At a high Reynolds-number region (1 000-2 200), the gelatin layer suppresses the increase in the apparent viscosity due to the turbulent transition and a similar effect occurs in case of the paraffin layer.

Key Words: Pipe Flow, Transition, Viscous Flow, Apparent Viscosity, Coating Layer.

1. 緒 言

たん白質は生物工学において最も重要となる高分子の一つであるため多くの研究者の興味を引き付けているが、流体力学的な見地からしても興味深い性質を有している。その一つとして挙げられるのは、管壁にコーティングされたたん白質の層が管内流動に与える影響である。この問題は血管の内面がたん白質でコーティングされているという仮説⁽¹⁾が動機となり始められたが、たん白質溶液を管路で輸送するときなどには必ず管壁にたん白質が付着するので、実用的な観点からしても重要な問題となる。

この問題に対する研究のうち最も有名なものの一つは Copley らの研究⁽²⁾⁻⁽⁴⁾である。彼らは管壁をさまざまな物質でコーティングし、コーティング層が流体の見掛けの粘性に与える影響を調べた。その結果、たん白質の一種であるフィブリンは血液や血しょうの見掛けの粘性を低下させること、およびパラフィンは見掛けの粘性を増加させることなどが示された。この問題はのちに小山ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって再実験されたが、小山ら

の結果は Copley らの結果と定性的な一致は見たものの、定量的には多くの相違が生じた。一方、コーティング層が流体の見掛けの粘性に与える影響に関する理論的研究も行われているが⁽¹⁾、まだ定説はなく、仮説の域を越えないのが現状である。そのため、現在最も必要なことは信頼のおけるデータの蓄積と物理的なメカニズムの提案と考えられる。

本研究は、最も基本的であるガラスの直管の内面にゼラチンをコーティングし、ゼラチン層が流体の見掛けの粘性係数に与える影響を調べたものである。用いた流体は水道水である。ゼラチンは我々の身の回りに存在するたん白質のうち最もなじみ深いものの一つであり、代表的なたん白質としてしばしば用いられる⁽⁷⁾。さらに本研究では比較として、Copley や小山が用いたパラフィンコーティング管も用いて実験を行った。本研究において特に注意した点はレイノルズ数の範囲である。管壁にコーティングされた物質が管内流動に与える影響はレイノルズ数に依存し、その値によって異なることは容易に予想されるが、これまでに行われた Copley や小山らの実験ではレイノルズ数はまったく示されておらず、実験の行われたレイノルズ数領域も明らかではない。本研究では流れを駆動するヘッドや管径を変化させることによりレイノルズ数の広

* 原稿受付 平成3年2月20日。

^{*1} 正員, 秋田大学鉱山学部(〒010 秋田市手形学園町1-1)。^{*2} 学生員, 秋田大学鉱山学部。

い領域におけるデータを求め、レイノルズ数の影響についての考察を中心課題とした。そして実験結果に基づいて、物理的なメカニズムを考察した。

2. 主要記号

- d : 管径
- g : 重力の加速度
- H : ヘッド
- L : 管路長さ
- Re : レイノルズ数
- T : 温度
- u : 軸方向平均速度
- λ : 管摩擦抵抗係数
- ζ_{ci} : 入口損失係数
- ζ_{ce} : 助走区間損失係数
- ζ_{co} : 出口損失係数
- μ_a : 見掛けの粘性係数
- μ_0 : 水の粘性係数
- ρ : 密度

3. 実験装置および方法

この実験では2種類のガラス管を用いた。用いたガラス管の幾何学的形状を表1に示す。管の断面は厳密な円ではなく軸比が1:1.2程度のだ円であるので、表1には水力等価直径が示されている。またどちらのガラス管においても、管路長さは助走区間より十分に長い。

ガラス管の内面にコーティング層を形成するために、まずガラス管を洗浄液の中に1日以上つけ、その後流水で洗う。ガラス管を十分に乾燥させたのちに、1%のゼラチン水溶液を流し乾燥させる。パラフィンの場合、パラフィンの2%ノルマルヘキサン溶液をガラス管内に流すことによりパラフィン層を形成させる。このようにして形成したすべてのゼラチンコーティング管とパラフィンコーティング管は顕微鏡で検査され、層がほぼ均一になっていることを確認した。層の厚さはゼラチンの場合にはほぼ $2\mu\text{m}$ 、パラフィンの場合には $1\mu\text{m}$ である。しかしながら、この数値にかなりの誤差があることは否定できないし、層の厚さの周方向均一性についても顕微鏡で確認したのみで定量的なことは言えない。そのため、層の厚さのばらつきおよび周方向非均一性に基づく誤差について考察する必要があるが、もしもこの効果が実験結果に大きな影響を与えているのなら、コーティング層は実験のたびごとに作成しているので、ゼラチンコーティング管、およびパラフィンコーティング管のデータはコーティ

ングを施していない管よりも大きなばらつきが生じるはずである。しかし、後で示される実験結果を見ればわかるように、そのような大きなばらつきは見られない。よって、コーティング層の厚さのばらつきおよび周方向非均一性はあまり大きくないことが予想される。なお、実験の前と後でコーティング層の変化を比較したが、実験後にも層のはがれのようなことは観察されなかった。

次に、実験装置について述べる。実験装置を図1に示す。コーティングを施されたガラス管②は内径12 mmの亚克力管①の中に置かれ、流体は亚克力管①からコーティングを施されたガラス管②を通して、ビニール管に流れ込む。流れを駆動するヘッド H は図1に示されている。亚克力管には一定の間隔で指針

表1 ガラス管の幾何形状

	d (mm)	L (mm)	L/d
Tube A	0.586	399.0	680.9
Tube B	0.820	250.0	304.9

- 1. acrylic tube 2. glass tube (test piece)
- 3. downstream vinyl tube 4. thermometer
- 5. sensor 6. thermometer 7. heating cable
- 8. voltage controller

図1 実験装置

が付けられており、水面がその指針間を通過するのに要する時間を測定することにより各ヘッドにおける流量および軸方向平均速度 u は求めることができる。流体の温度はヒーティングケーブル⑦とコントローラ⑧で設定することができ、流体温度が一樣になっていることは温度計④を用いて確認する。実験中は温度計④を取り外し、実験中の水温の変化はセンサ⑤を用いて確認する。今回の実験では流体の温度は $25 \sim 35^\circ\text{C}$ の範囲であり、実験中の温度変化は 0.1°C 程度であった。

次に、コーティングされたガラス管内の見掛けの粘性係数を求める方法について述べる。図1からわかるように、流体アクリル管からガラスコーティング管を通して、ビニール管へと流れる。アクリル管の内径は 12 mm でありビニール管の内径は 6 mm とガラスコーティング管より十分太いので、全圧力損失は、(1) ガラスコーティング管へ流れ込むときの入口損失、(2) ガラスコーティング管内の助走区間損失、(3) ガラスコーティング管内の摩擦損失、(4) ガラスコーティング管出口における出口損失、の総和によって表される。この値は流れを駆動するエネルギー、 $\rho g H$ に等しい。よって次の式が得られる。

$$\rho g H = 1/2 \rho u^2 \cdot (L \cdot \lambda/d + \zeta_{ci} + \zeta_{ce} + \zeta_{co}) \cdots \cdots (1)$$

実験で測定された H および u を用いて上式から λ を求めるとき、各損失係数の値は、 $\zeta_{ci} = 0.5$, $\zeta_{ce} = 0.2$, $\zeta_{co} = 2.0$ とした。この値にはかなりの誤差があることが予想されるが、今回の実験では L/d がかなり大きいガラス管を用いているので $(\zeta_{ci} + \zeta_{ce} + \zeta_{co})$ の値は $L\lambda/d$ の値の3%以下である。そのため、これらの数値が有する誤差が λ に与える影響は十分小さく無視できるものと考えられる。式(1)から λ が求められたら、その λ に基づいてガラス管内の見掛けの粘性係数 μ_a は次のように定義する。

$$\mu_a = \lambda \cdot \rho u d / 64 \cdots \cdots (2)$$

流れが層流でガラス管にコーティングが施されていないときは上式から求められた値は本来の水の粘性係数 μ_0 に一致するはずである。そのため μ_a と μ_0 とを比較することによりコーティングの効果を調べることができる。

これらの式は流れが層流のときのみ成り立つことは明らかである。流れが乱流に遷移すればコーティングを施していないガラス管の場合でも式(2)から得られる μ_a は μ_0 と異なってくる。しかしながらこのずれは乱流への遷移に対応しているので、このずれに基づけば流れの乱流遷移に関する議論をすることができる。これらの理由より本研究ではレイノルズ数が高くなっ

ても式(2)に基づいて μ_a を求めた。そして、ゼラチンコーティング管のデータ、パラフィンコーティング管のデータ、およびコーティングを施していないガラス管のデータを比較することにより、コーティング層が乱流遷移に及ぼす影響を議論した。

なお、ガラス管の内面にさまざまな物質がコーティングされていると、管の内径は細くなる。そこで本研究においては管の内径からコーティング層の厚さを引くことによりコーティング層の厚さの補正を行った。

4. 実験結果

まず、実験結果の一例を図2, 3に示す。いずれもコーティングを施されていないガラス管が用いてあり、縦軸は式(2)より求められる見掛けの粘性係数、横軸はヘッド H である。図2は表1における Tube A、図3は Tube B を用いている。図2からわかるように、ヘッド(レイノルズ数)が小さいときは μ_a は1%以下の誤差範囲内で μ_0 と一致し、この実験装置の妥当性を示している。一方、ヘッド(レイノルズ数)が大きい場合には、図3からわかるように μ_a は μ_0 より大きくなっている。これは流れに乱れが生じるためと考えられる。このようにレイノルズ数によって実験結果は変

図2 実験結果の一例 (Tube A)

図3 実験結果の一例 (Tube B)

化するので、その効果を調べるために、次なる無次元量を用いる。

$$\mu^* = \mu_a / \mu_0, \quad Re = \rho u d / \mu_0$$

まず、レイノルズ数が小さい領域における実験結果を図4から図6に示す。これらの図においてガラス管は表1における Tube A を用いており、コーティングを施されていないガラス管、ゼラチンコーティング管、パラフィンコーティング管の場合の結果がそれぞれ図4～6に示されている。これらの図から以下のことがわかる。

(1) ゼラチンコーティングは流体の見掛けの粘性

図4 低レイノルズ数領域における実験結果
(コーティングが施されていないガラス管)

図5 低レイノルズ数領域における実験結果
(ゼラチンコーティング管)

図6 低レイノルズ数領域における実験結果
(パラフィンコーティング管)

係数を4%程度低下させる効果を有する。

(2) パラフィンコーティングはこの範囲内では見掛けの粘性係数にほとんど影響を与えない。

(3) レイノルズ数もまたこの領域では見掛けの粘性係数にほとんど影響を与えない。

次に、高レイノルズ数領域における実験結果を図7から図9に示す。これらの図においてガラス管は表1における Tube B が用いられ、コーティングを施されていないガラス管、ゼラチンコーティング管、パラフィンコーティング管の場合の結果がそれぞれ図7～9に示されている。図8, 9においてハッチングが施されている領域はコーティングが施されていないガラス管の場合の実験結果(図7)が存在する範囲を示している。また実験結果を最小二乗法でフィッティングした結果は図10に示されている。これらの図より次の結果

図7 高レイノルズ数領域における実験結果
(コーティングが施されていないガラス管)

図8 高レイノルズ数領域における実験結果
(ゼラチンコーティング管、ハッチングはコーティングがない場合の実験結果(図7)が存在する範囲を示す)

図9 高レイノルズ数領域における実験結果
(パラフィンコーティング管、ハッチングはコーティングがない場合の実験結果(図7)が存在する範囲を示す)

が得られる。

(1) コーティングを施していないガラス管の場合には、レイノルズ数が約1300程度で μ^* の値が増加に転ずるが、ゼラチンコーティング層、およびパラフィンコーティング層は μ^* の値が増加に転ずるときのレイノルズ数を200から300程度遅らせる。

(2) ゼラチンコーティング層の効果はレイノルズ数が1800程度において最も顕著となり、見掛けの粘性係数を5%程度低下させる。

(3) パラフィンコーティング層もまたこの領域では見掛けの粘性係数を低下させる効果を有し、レイノルズ数が約1200以上の領域にてその効果が表れる。これらの結果が得られた原因について議論するまえに、結果の信頼度について少し考察する。今回の実験において、コーティング層の厚さおよび周方向均一性についてはすでに述べたようにかなりの誤差がある。しかし、コーティングを施すことにより管の内径が広がることはない。そのため、コーティングの効果がただ単に管径を細くするだけなら見掛けの粘性係数は増加するはずであるが、今回の実験ではゼラチンコーティング管のデータ、およびパラフィンコーティング管の遷移領域のデータは仮に管径補正をしなくても見掛けの粘性係数は低下した(図は省略)。そのためこれらの結果は、ただ単に管径を細くするだけではない効果がコーティングによってもたらされたことを示している。以上の理由により、今回の実験結果はコーティング層の厚さに伴う不確定さでは説明できない有意な効果を示していると判断した。

今回の実験結果において最も注目されることはコーティング層が流体の乱流遷移に影響を与えることであり、このことを明らかにしたのは本研究が初めてと思われる。このような結果が得られた物理的メカニズムについては5章で考察する。

図10 最小二乗法によるフィッティング結果
(—: コーティングがないガラス管)
(---: ゼラチンコーティング管)
(····: パラフィンコーティング管)

5. 考 察

初めに述べたように、コーティング層が流体の見掛けの粘性係数に与える影響についてはさまざまな理論が提案されているが、まだ定説はない⁽¹⁾。また本研究においてコーティング層が流体の乱流遷移に影響を及ぼすことが明らかになったが、これまで提案された説ではこの結果は説明できない。そのためここでは、実験結果に基づいて別の説を提案する。

まず、ゼラチンコーティング層の場合に対して考察する。よく知られているように、ゼラチンは一種の高分子⁽⁷⁾であるため、その表面は絡み合った鎖のようになっているものと考えられる。そのためわずかな外力で容易に変形することが予想されるので、ゼラチン表面は『柔らかい壁』を形成していることが予想される。柔らかい壁を有する管路内の流れについてはいくつかの研究例があり⁽⁸⁾⁽⁹⁾、これらによると柔らかい壁は、その変位がわずかであっても管内流動にさまざまな影響を及ぼすことが指摘されている。まず層流域では、竹光・松信らの二次元チャンネル内流れの解析的研究があり⁽⁸⁾、彼らは壁の変位がチャンネル幅の0.69%のとき、圧力損失は1.5%程度低下することを示した。一方図5の層流域でのデータでは、表1のTube Aが用いられており、コーティング層の変位を仮に0.5 μm とすれば、半径に対する壁の変位は0.17%となり圧力損失の低下(見掛けの粘性係数の低下)は4%となる。もちろん竹光・松信らの解析と本研究とは幾何学的形状や壁の剛性、レイノルズ数の領域などが異なるので厳密な比較はできないが、両者の結果はオーダ的には一致する。また、竹光・松信は壁の変位が小さい場合には、壁の変位と圧力損失の低下とはほぼ比例することを示した⁽⁸⁾。そのため今回の実験では、コーティング層の効果は層の厚さが同じなら管の内径が太いほど弱くなることになる。図8において、レイノルズ数が低い領域では見掛けの粘性係数の低下が1から3%程度になり、図5の値と一致しないことはこの考察から説明される。

柔らかい壁が乱流遷移に及ぼす影響についてはすでに述べたように研究例⁽⁹⁾があり、10 mmの円管において2~7 μm の変位が臨界レイノルズ数を500程度増加させることが示されている。このように直径の0.02~0.07%という小さな変位でも臨界レイノルズ数を55程度も増加させることが知られているので、今回の結果をゼラチンコーティング層が引き起こしたということは、ゼラチンコーティング層が2 μm と薄くても十分予想できる。

なお、高分子のコーティング層が流体の見掛けの粘性係数に影響を与えることはすでに Silberberg⁽¹⁰⁾ が指摘している。彼は高分子の鎖が管路内の流体の抵抗となり、流量を低下させる効果を予想した。そしてこの効果を『バルブ』と称した。しかし『バルブ』では見掛けの粘性係数の低下を説明することはできず、本研究のように考えたほうが妥当と考えられる。

最後にパラフィンコーティング層の効果について考える。パラフィンコーティングではその表面が柔らかい壁を形成しているとは考えにくく、表面は変形しないものと考えられる。そのために変形の効果が見られず、層流域では見掛けの粘性係数に変化が生じなかったものと考えられるが(図6)、遷移域での結果(図9)はこれだけでは説明できず、今後の課題としたい。しかし、このことはコーティングする物質によって遷移領域の特性が大きく変化する可能性があり、より大きな変化をもたらす物質の存在も示唆している。

コーティング層が乱流遷移に与える影響については研究例はほとんどなく不明な点も多い。本研究はまだ初歩的なものであるが、コーティング層が流体の乱流遷移に影響を与えることを明らかにし、ゼラチンという限られた物質に対してだけであるが、その物理的メカニズムを提案した点で意義があるものとする。今後、さらに多くのデータを蓄積し、現象を明らかにすることが必要と考えられる。また他のメカニズムについての検討も必要と考えられる。

6. 結 言

壁面にコーティングされた物質が流体の見掛けの粘性係数および乱流遷移に与える影響を調べることを目

的として、ゼラチンとパラフィンのコーティング層を有するガラス管内における水の見掛けの粘性係数を測定した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1)低レイノルズ数領域(200~500)では、ゼラチンコーティング層は流体の見掛けの粘性係数を4%程度低下させるが、パラフィンコーティング層は見掛けの粘性係数にほとんど影響を与えない。(2)高レイノルズ数領域(1000~2000)においては、ゼラチンコーティング層は乱れの発生に伴う流体の見掛けの粘性係数の上昇を抑える効果を有し、パラフィンコーティング層もまたこの領域ではゼラチンと定性的に同様の効果を有する。

さらにこのような効果が得られた原因について考察し、ゼラチンの場合には壁面の柔らかさで定性的に説明できることが示された。今後、パラフィンの場合のメカニズムの解明やさらに系統的な実験が要求される。

文 献

- (1) 岡, バイオレオロジー, (1984), 152, 荻原房.
- (2) Copley, A. L., *Nature*, **181**-4608 (1958), 551.
- (3) Copley, A. L., Scott Blair, G. W., Glover, F. A. and Therley, R. S., *Kolloid-Z.* **168**-2 (1960), 101.
- (4) Copley, A. L. and Scott Blair, G. W., *Rheol. Acta.*, **1**-4 (1961), 665.
- (5) 小山・北原・金丸・和田, 材料, **16**-166 (1967), 525.
- (6) Koyama, K., Ooi, E., Wada, E. and Kanamaru, K., *Rep. Prog. Polymer Phys. Jpn.*, **14** (1971), 635.
- (7) 長洞・島内, 日本レオロジー学会誌, **14** (1986), 184.
- (8) 竹光・松信, ながれ, **5**-3 (1986), 254.
- (9) 荒川・松信, ながれ, **7**-3 (1988), 258.
- (10) Silberberg, A., *Biorheology*, **4** (1967), 82.