遷移領域におけるエマルジョンの管内流動特性に関する研究*

中村 雅英^{*1}, 滝沢 久^{*2}, 田中 孝治^{*3}An Investigation on the Pipe Flow of Emulsions
in the Transitional Region

Masahide NAKAMURA, Hisashi TAKISAWA and Koji TANAKA

The steady flow characteristics of emulsions through a pipe are studied experimentally in the transitional flow region. Butyl benzonate, a mixture of butyl benzonate and castor oil, and a mixture of liquid paraffin and carbon tetrachloride are used as the dispersed phase. In addition, water is used as the dispersion medium. The experimental results are summarized as follows. 1) These emulsions have the effect of decreasing the critical Reynolds number. 2) In the case of emulsions with a large diameter for the dispersed phase (about 10 μm), a decrease in the apparent viscosity coefficient in a high laminar flow region can be observed. 3) These results conform well to the existing experimental results for blood.

Key Words: Multiphase Flow, Pipe Flow, Transition, Viscous Flow, Emulsion

1. 緒 言

血液はおもに血しょうと赤血球とから構成される。そして血しょうはニュートン流体であることが知られているので⁽¹⁾, 血液の複雑な性質は赤血球の存在によるところが多い。赤血球の有する特長のうち、近年特に注目されているのはその著しい変形能である⁽²⁾⁽³⁾。そのため血液とは容易に変形する微小粒子を大量に含んだニュートン流体とみなすこともできるが、この粒子の変形が流体の特性に与える影響についてはいまだ不明なことが多い。この問題について研究するには、容易に変形する微小粒子を含んだ液体を生成することが必要になるが、赤血球の変形能はきわめて著しく液体に近いことが知られている⁽⁴⁾。よって血液のモデルとして互いに溶け合わない液体による液-液混相流、すなわちエマルジョンを用いればよい。

本研究はさまざまな液体を用いてエマルジョンを作成し、その管内流動特性を実験的に研究し、結果と既存の血液に関する実験結果とを比較・検討したものである。大動脈内流れは遷移領域にあるため本研究では

特に遷移流れに着目し、遷移領域における管摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関連について実験的に求め、その特徴について検討を行っている。

エマルジョンの流動特性に関する研究は、これまではおもに工業的な見地から行われてきたがあまり研究例は多くなく⁽⁵⁾⁽⁶⁾、遷移流れを中心課題としたものはほとんどないのが現状である。

2. 実験装置および方法

2.1 エマルジョンの生成 まず、エマルジョンの生成装置について述べる。今回の実験では静止形管内混合器〔東レエンジニアリング(株)、ハイミキサー SWS 10-05〕を用いて、エマルジョンを生成した。この方法は比較的短時間で大量のエマルジョンが生成でき、微小な粒子径のエマルジョンも作成可能である⁽⁷⁾という優れた特長を有している。次に今回の実験に用いたエマルジョンの化学的な組成および分散質の粒子径を表1に示す。すべてのエマルジョンにおいて分散媒は水道水が用いられている。分散質としては、A から C までは安息香酸ブチルが用いられており、D と E には分散質の粒子径 d_0 を大きくするために、ひまし油が混合されている。また F には、水と同じ密度になるように混合された流動パラフィンと四塩化炭素が

* 原稿受付 平成4年3月13日。

^{*1} 正員、秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町1-1)。^{*2} (株)秋田日本電気 (〒010 秋田市御所野下堤3-1-1)。^{*3} (株)セイコー電子 (〒136 東京都江東区亀戸6-31-1)。

用いられている。これらすべてのエマルジョンを安定化させるために、界面活性剤が分散媒の3%混合されている。エマルジョンの粒子径 d_0 の分布状況の一例を図1に示す。図1からわかるように粒子径の均一性はかなり良い。また今回生成したエマルジョンの安定性はきわめて良く、数週間経過しても粒子の合一のようなことは生じなかった。さらに、実験前と実験後とを比較しても、エマルジョンが合一して粒子径が大きくなることや、分裂して小さくなることはなかった。なお表1からわかるように、DからFまでのエマルジョンの粒子径は約 $10\mu\text{m}$ であり、赤血球の大きさとほぼ同じであることは注意すべきである。またエマルジョンの形は容易に予想できるようにすべて球形である。

2.2 流動特性測定装置 測定装置を図2に示す。供試流体が入ったタンク④は内径 50 mm の透明アクリル管であり、一定の間隔で指針が付けられている。そのため、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流量および試験管路内断面平均軸方向速度 u を求めることができる。このタンクはコンプレッサ①により加圧され、その圧力はレギュレ

ータ②により制御され、圧力ゲージ③で読取る。試験管路⑤は内径 $d=2.55\text{ mm}$ 、長さ $L=1\,000\text{ mm}$ のガラス直管でありその長さは助走区間よりはるかに長い。また試験管路出口から逆圧力タンク⑦までは、内径が試験管路の10倍程度、長さが試験管路の1/10程度の管路で接続されている。今回の実験装置において流体の温度は逆圧力タンク⑦内で計測されている。そ

図1 エマルジョンの粒径分布

表1 エマルジョンの化学的組成および粒径

Fluid: A	① butyl benzoate ② Tween 20 ③ 50% ④ $3\mu\text{m}$
Fluid: B	① butyl benzoate ② Tween 20 ③ 30% ④ $3\mu\text{m}$
Fluid: C	① butyl benzoate ② Tween 20 ③ 20% ④ $3\mu\text{m}$
Fluid: D	① butyl benzoate + castor oil (1:1) ② Tween 20 ③ 30% ④ $10\mu\text{m}$
Fluid: E	① butyl benzoate + castor oil (1:1) ② Tween 20 ③ 20% ④ $10\mu\text{m}$
Fluid: F	① liquid paraffin + carbon tetrachloride (7.1:1) ② sodium oleate ③ 30% ④ $10\mu\text{m}$

- ① dispersed phase
② surface active agent
③ concentration of dispersed phase
④ mean diameter of dispersed phase

1. Compressor. 2. Pressure regulator. 3. Pressure gauge. 4. Tank. 5. Test section (glass tube). 6. Valve. 7. Back pressure tank

図2 実験装置

の結果、実験時間が比較的短いこともあり、実験中の温度変化は 0.5°C 以下であった。

次に管摩擦損失係数 λ の求め方について述べる。すでに述べたことからわかるように全圧力損失は、(1)流体がガラス管に入るときに入口損失、(2)ガラス管内における助走区間損失、(3)ガラス管内における摩擦損失、(4)ガラス管から出口損失、の総和によって表される。この値はコンプレッサによって与えられる圧力 P と高さヘッド H によって与えられる圧力(図2)の和に等しい。よって次式が成り立つ。

$$P + \rho g H = 1/2 \cdot \rho u^2 \cdot (L\lambda/d + \xi + \zeta_i) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ξ は出口損失と助走区間損失係数の和でありニュートン流体に対しては

$$\xi \approx 2.3 \quad (\text{層流})$$

$$1.07 \quad (\text{乱流})$$

となる⁽⁸⁾。また ζ_i は入口損失係数であり、ニュートン流体では $\zeta_i = 0.5$ 程度である。これらの数値を今回のエマルジョンに関する実験に用いることに対してはやや問題があるが、(1)今回の実験では L/d が390程度の長いガラス管を用いているので、 $(\xi + \zeta_i)$ の値は $L\lambda/d$ の2%以下となること、(2)今回用いたエマルジョンの非ニュートン性は後で示されるようにあまり強くないこと、などを考えればこれらの数値を用いることによる誤差はほとんど λ の値に影響を与えないものと考えられる。

装置の妥当性を確認するため、水を用いて予備実験を行った。結果を図3に示す。図3において縦軸は管摩擦抵抗係数 λ であり、横軸はレイノルズ数 Re である。 Re は次式で定義される。

$$Re = \rho u d / \mu \dots\dots\dots (2)$$

ここで μ は粘性係数である。図3からわかるように実験結果は、層流域ではポアズイユの法則、乱流域ではブラジウスの法則と良く一致し装置の妥当性を示している。また臨界レイノルズ数は約2200となっている。

3. 実験結果および考察

3.1 エマルジョンの非ニュートン性 まずエマルジョンがニュートン流体であるか否かという問題について検討する。この問題について考察するため実験より得られた管摩擦抵抗係数 λ をずり速度の関数としてプロットする。本実験では流れは完全に発達していると考えられるのでずり速度は u/R で定義できる。ここで R はガラス管の半径である。このように定義するとずり速度はニュートン流体の完全に発達した流れならばレイノルズ数に比例するので、ニュートン流体

ならば管摩擦抵抗係数はずり速度に反比例するはずである。結果の一例を図4に示す。図4はこのエマルジョンがニュートン流体であることを示している。図4は省略したが他のエマルジョンもずり速度が 2000 s^{-1} の領域ではこのような結果になったため、今回用いたエマルジョンはすべてずり速度が 2000 s^{-1} 以下の領域においてニュートン流体であることがわかった。その場合はポアズイユの法則が成り立つので、ポアズイユの法則から粘性を求め、式(2)に従いレイノルズ数を計算した。今回用いたエマルジョンの粘性係数はこの方法により計算すると $3\text{ mPa}\cdot\text{s}$ から $6\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 程度の値となり実際の血液とほぼ同程度の値を有している。しかしながら、ずり速度が 2000 s^{-1} 以上の領域では一部のエマルジョンではポアズイユの法則より計算

図3 水を用いた場合の予備実験結果

図4 管摩擦抵抗係数とずり速度の関連

した粘性係数の低下が認められ、弱い非ニュートン性があることがわかったが、それについては3・2節で述べる。

3・2 遷移領域におけるエマルジョンの流動特性

遷移領域における管摩擦抵抗係数に関する実験結果を図5から図9に示す。図5と図6は粒子径が $3\mu\text{m}$ 程度の場合、図7から図9までは粒子径が $10\mu\text{m}$ 程度の場合である。これらの図において、横軸は2章で述べたような方法で計算したレイノルズ数である。また図5～9中の折れ線は水を用いた場合の結果を示している。

まず第1にこれらの結果からわかることは、すべての図においてエマルジョンは乱流に遷移する臨界レイノルズ数を低下させていることである。この結果はきわめて顕著に現れているが、これまでに指摘されたことはほとんどなく、本研究が初めてと考えられる。次

にこの結果を既存の血液に関する実験結果と比較する。ガラス管内における血液の摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係は古くから調べられており、CoulterとPappenheimerによれば、血液を用いた場合とニュートン流体である水を用いた場合との差はおもに遷移領域において現れ、血液は臨界レイノルズ数を低下させることが示されている⁽⁹⁾。この結果は本研究結果と定性的に良く一致しており、血液はエマルジョンであることを示している。このような結果が得られた原因について説明するために、赤血球が乱れに与える影響を研究したSteinらの実験結果⁽¹⁰⁾を引用する。彼らは赤血球濃度（ヘマトクリット）の異なるさまざまな血液を用いて狭窄後部の乱れをフィルムプローブで測定した。その結果、赤血球を含んだ血液は血しょうだけの場合よりも乱れが強く、赤血球が乱れの発生源となることを示した。この結果に基づけば、赤血球や液体の

図5 実験結果 (I)

図7 実験結果 (III)

図6 実験結果 (II)

図8 実験結果 (IV)

図9 実験結果 (V)

微小粒子を含む流体はそれを含まない流体より乱れが発生しやすくなることが容易に予想でき、血液やエマルジョンがニュートン流体よりも低い臨界レイノルズ数を有することが理解できる。

図5から図9の結果においてももう一つ注目されることは層流高レイノルズ数領域における管摩擦抵抗係数である。すなわち、粒子径が小さい場合(図5, 6)には層流高レイノルズ数領域においても実験結果はポアズイユの法則に良く一致しているが、粒子径が大きい場合(図7~9)には図7を除いて実験結果はポアズイユの法則よりも下方に位置することである。ポアズイユの法則より求めた粘性係数を見掛けの粘性係数と呼ぶことにすれば、このことは粒子径が大きくなると層流高レイノルズ数領域においてエマルジョンの見掛けの粘性係数は低下しやすくなることを意味する。この実験結果は高レイノルズ数領域(高ずり速度領域)における微小粒子の変形によって説明される。すなわち、ずり速度が大きくなると容易に予想されるように液体微小粒子は球形からだ円形に変形し⁽¹¹⁾、流線形に近づく。その結果として、微小粒子の存在によって生じる流体の流れにくさ(見掛けの粘性)が低下したものと考えられる。さらに、この結果もまた実際に血液を用いた実験で確認されていることは⁽¹²⁾興味深い。なお図7に示されるように、粒子径が大きくても層流高レイノルズ数領域で見掛けの粘性係数が低下しないこともある。この原因は今後の課題に残される。

これまでの結果から、本研究で用いたエマルジョンは血液の特性と多くの共通点を有することが明らかとなった。しかし、多くの異なる点も有することは明らかである。その一つとして、微小粒子の形状が挙げら

れる。よく知られているように、赤血球は両凹円板形であるのに対して、本研究で用いたエマルジョンは球形である。この形状の違いが流体の性質に与える影響に関しては文献(13)に記述がある。すなわち形状が球に近くなると流体の粘性が増し、非ニュートン性が弱くなることが述べられている。本研究で用いたエマルジョン生成方法では球形以外のエマルジョンは生成できないのでエマルジョンの形状に関する議論は不可能であるが、今後に残された興味深い課題と考えられる。

4. 結 言

安息香酸ブチル、ひまし油、四塩化炭素、流動パラフィンなどの混合液を分散質、水道水を分散媒としたエマルジョンを作成し、遷移領域におけるその流動特性を実験的に測定した。その結果、以下の結果が示された。

(1) エマルジョンとニュートン流体との差はおもに遷移領域において現れ、エマルジョンは臨界レイノルズ数を低下させる効果を有する。

(2) 粒子径が10 μm程度のときは層流高レイノルズ数領域において見掛けの粘性係数の低下が見られることもあるが、粒子径が3 μm程度のときはこのようなことは生じない。

(3) 上記のことは既存の血液を用いた実験結果と一致し、血液はエマルジョンであることを示唆する。

本研究を行うに当たり、実験装置の製作に多大なるご協力をしてくださった秋田大学 加藤隆一技官に深く感謝申し上げる。

文 献

- (1) 岡, バイオレオロジー, (1984), 51, 裳華房.
- (2) 沖野・菅原・松尾 編, 心臓血管系の力学と基礎計測, (1982), 135, 講談社.
- (3) 文献(1)の83ページ.
- (4) Skalak, R., Keller, S. R. and Secomb, T. W., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **103**(1981), 102.
- (5) 梅屋・磯田・石井, 材料, **15**-132(1966), 271.
- (6) Nawab, M. A. and Mason, S. G., *Trans. Faraday Soc.*, **54**(1958), 1712.
- (7) 化学工学協会編, 化学工学の進歩 16, 気泡・液滴・分散工学, (1982), 125, 横書店.
- (8) 日本機械学会編, 機械工学便覧(新版), (1987), A 5-77.
- (9) Coulter, N. A., Jr. and Pappenheimer, J. R., *Am. J. Physiol.*, **159**(1947), 401.
- (10) Stein, P. D., Sabbah, H. N. and Blick, E. F., *Biorheology*, **12**(1975), 293.
- (11) 文献(1)の83ページ.
- (12) 文献(1)の89ページ.
- (13) 文献(1)の76ページ.