

山梨大学 工学部 正会員 宮沢 直季
山梨大学 工学部 正会員 荻原 能男
横浜市役所 正会員 手塚 久司

1. はじめに 本研究は、レオロジー的アプローチから非ニュートン流体の管路抵抗則について検討することを目的とし、ニュートン流体で定義するレイノルズ数を非ニュートン流体にも拡張して新しく定義し、従来のムーディ図表にも拡張可能であることを確認するとともに、摩擦以外(急拡、曲がり)の損失係数の特性を明らかにしようとするものである。

2. 拡張されたレイノルズ数の定義¹⁾ ここでは、非ニュートン流体において最も代表的なビンガム流体を対象とする。まず、非ニュートン流体における拡張されたレイノルズ数を定義しておく。図-1に、ビンガム流体の拡張されたレイノルズ数 Re_1 、 Re_4 および無次元係数 k_1 の誘導の流れ図を示す。レイノルズ数は、(2)式で示すように流れを乱そうとする力(慣性力)と乱すまいとする力(粘性力)の比で表される。この場合、せん断応力 τ はビンガム流体におけるレオロジー方程式(1)式であり、(2)式に代入することによって物理的に定められる拡張されたレイノルズ数 Re_1 が誘導される。なお、式中の無次元係数 k_1 は諸量の代表値を用いるための係数である。一方、別に水理学的に拡張されたレイノルズ数を定義すると、流れが層流の場合の円管内流動を支配する方程式[Buckingham-Reinerの流量公式]は、(3)式で表される。この式と摩擦損失係数 f の定義式(4)式を用いて f を求めると(5)式となり、層流域においてムーディ図表に適用できる拡張されたレイノルズ数 Re_4 [(6)式]を誘導できる。 $Re_1 = Re_4$ すると無次元係数 k_1 は(7)式となる。

3. 摩擦損失係数 2. で定義されたレイノルズ数が、従来のムーディ図表に拡張できることを実験的に確認するために、内径20mmと30mmの塩化ビニール管を用いて実験を行った。実験用流体は、水とペントナイト(比重1.09~1.15)を均質に混合したものをを用い、一般的な水平管内流動法で行った。そのときの流量とマンノメータによる摩擦損失水頭を測定し層流のときのデータより(3)式の最小自乗法による正規方程式をたてて、塑性粘度 η_{pl} 、降伏応力 τ_f を求めた。図-2は無次元係数 k_1 と拡張されたレイノルズ数 Re_1 の関係を示した図である。図-4のムーディ図表からもわかるように $Re_1 < 2000$ のとき層流で、この層流域では無次元係数 k_1 の値はほぼ0.16~0.18の値であることがわかる。しかし、 $Re_1 > 2000$ の乱流域では、 k_1 はその物理的意味を失い、 k_1 の増

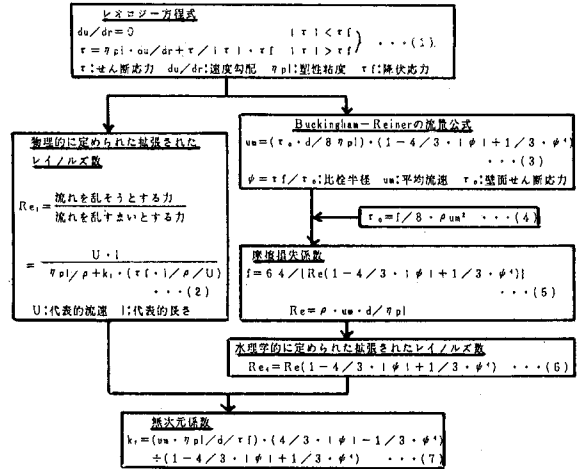


図-1 ビンガム流体の拡張されたレイノルズ数 Re_1 、 Re_4 および無次元係数 k_1 の誘導の流れ図

3. 摩擦損失係数 2. で定義されたレイノルズ数が、従来のムーディ図表に拡張できることを実験的に確認するために、内径20mmと30mmの塩化ビニール管を用いて実験を行った。実験用流体は、水とペントナイト(比重1.09~1.15)を均質に混合したものをを用い、一般的な水平管内流動法で行った。そのときの流量とマンノメータによる摩擦損失水頭を測定し層流のときのデータより(3)式の最小自乗法による正規方程式をたてて、塑性粘度 η_{pl} 、降伏応力 τ_f を求めた。図-2は無次元係数 k_1 と拡張されたレイノルズ数 Re_1 の関係を示した図である。図-4のムーディ図表からもわかるように $Re_1 < 2000$ のとき層流で、この層流域では無次元係数 k_1 の値はほぼ0.16~0.18の値であることがわかる。しかし、 $Re_1 > 2000$ の乱流域では、 k_1 はその物理的意味を失い、 k_1 の増

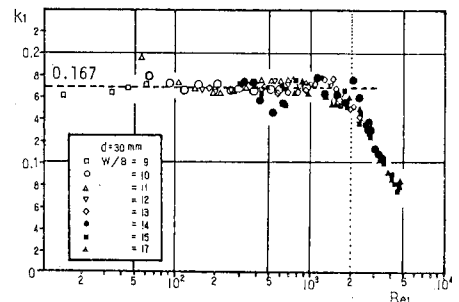


図-2 拡張されたレイノルズ数 Re_1 と無次元係数 k_1 の関係

加とともに急激に0に近づく。図-3(a)は Thomas, D. G. によって誘導された式(8)²⁾を実験値と比較するために、Hedstöm数 $He = \rho \cdot \tau f \cdot d^2 / \eta \rho l^2$ をパラメータとして、摩擦損失係数 f とニュートン流体として定義するレイノルズ数 Re の関係を示した図である[一般のムーディ図表]。一方、図-3(b)は拡張したレイノルズ数 Re_1 、 Re_4 を用いたムーディ図表である。このレイノルズ数を用いることによって濃度に関係なく層流における抵抗則 $f = 64 / Re_1$ あるいは $f = 64 / Re_4$ と一致する。また、本実験での範囲では、拡張されたレイノルズ数を用いても限界レイノルズ数がほぼ2000であることがわかる。

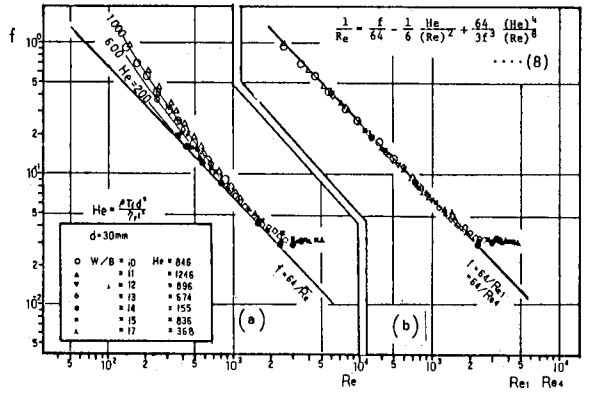


図-3 (a)ニュートン流体のレイノルズ数 Re を用いたムーディ図表
(b)拡張されたレイノルズ数のムーディ図表への適合性

4. 摩擦以外(急拡、曲がり)の損失係数 図-4は、急拡損失水頭 h_{se} と平均流速 $u_m (=u_1)$ の関係を示した図である。この図より水-ベントナイト比 W/B が大きく流速が速いところでは h_{se} は u_m の2乗に比例しているが、 W/B が小さく流速が遅いところではばらつきが大きい。理由として、粘性の影響で局所渦の発生が抑制されることと思われる。図-5は曲がり損失水頭 h_b と平均流速 u_m の関係を示した図である。濃度に関係なく h_b が u_m の2乗に比例しており、局所渦が発生してエネルギーが消失していることがわかる。図-6は、急拡損失係数 f_{se} を示した図である。図中の値0.309はボルゲの式より求めた急拡損失係数であり、実験値はこの値を中心に相当ばらついている。図-7は曲がり損失係数 f_b を示した図である。図中の値1.129はエルボ(90°)による実験値³⁾であるが、レイノルズ数 Re_4 の増加とともにこの値に近づくことがわかる。

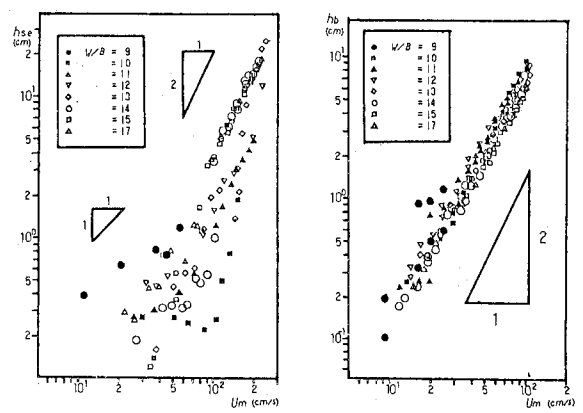


図-4 急拡損失水頭 h_{se} と平均流速 u_m 図-5 曲がり損失水頭 h_b と平均流速 u_m

5. おわりに 本研究の結果より、非ニュートン流体について、物理的、水理学的に拡張されたレイノルズ数を提案し、ムーディ図表への適合性を理論、実験の両面より確かめた。また、摩擦以外の損失係数の特性が実験より明らかとなった。最後に、本研究を行うにあたり東京都立大 村田二郎教授に有益な御助言をいただきました。ここに記して感謝致します。

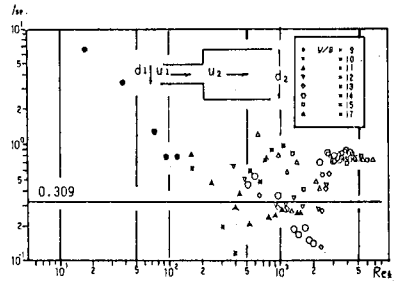
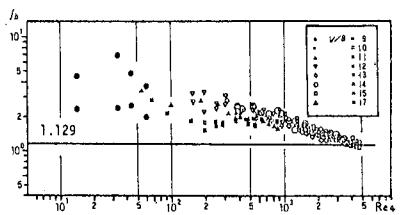


図-6 急拡損失係数 f_{se} 図-7 曲がり損失係数 f_b

参考文献 1) 荻原能男: 第3 9 回年講, 625 ~ 626, 1984 2) Thomas, D. G. : I & EC, Vol 155, No 11, 18 ~ 29, 1963 3) 本間 仁: 標準水理学, 丸善