

粗面上の薄層流の抵抗則に関する一考察

神戸大学工学部 正 員 神田 徹
 滋 賀 県 正 員 小笠原俊明
 神戸大学大学院 学生員 喜久里政宏

まえがき

粗面上の薄層流は、水深が粗度高さと同じオーダーを持つ流れであるため、水路床における抵抗を考える際に、水深の基準面の取り方が重要となる。従来、粗度要素の幾何学的形状から一意的に定まる基準面がSchlichtingにより提案されているが、この幾何学的基準面を用いた抵抗係数の実験値は、粗度要素や流れの性状によって変化し、いまだ統一的な把握がなされていない。本研究では、水理学的特性を導入してこの基準面の高さを設定し、これによって算定される抵抗係数の値について検討を行なった。

1. 実験装置及び実験方法

実験水路は長さ585cm、幅42.4cm、の亚克力樹脂製である。粗度には1.0~1.25mmでふるい分けた平均粒径 $k=1.2\text{mm}$ のガラス球を用い、所定の集中度で水路床面に一様に付着させた。ここに、集中度はSchlichtingが提案した、 $C=nq/A$ (n : 面積 A の水路床面に含まれる粒子数、 q : 粒子の水路床への投影面積)で定義されるものである。実験条件は、水路床勾配 S_0 を5種類(0.0272, 0.0130, 0.00807, 0.00353, 0.000717)、集中度 C を4種類(0.0625, 0.113, 0.377, 0.625)とし、各ケース毎に水深、流量、流速分布を測定した。水深は $1/10\text{mm}$ 読みのポイントゲージにより、8断面24地点で測定し、その平均値を平均水深とした。また流速分布は、熱線流速計により、また表面流速は亚克力微粉末を流して測定した。

2. 実験結果と考察

(1) 水深の基準面について

粗面上の薄層流の抵抗則を論じる際に、水路床面の位置、すなわち、水深の基準面の高さをどのように設定するかが問題となる。従来の研究ではPhelps^(2,3)は、 $\Delta h_1 = n\tau/A$ (τ : 粒子1個の体積)で定義されるSchlichtingの幾何学的水路床面を基準面として採用している。本研究では測定した流速分布から次のように基準面を設定した。得られた流速分布の一例が図-1である。ここに、 u_s は表面流速、 h は測点での水深である。粗度の影響によって放物線分布からかなりはずれるが、水面近くではほぼ放物線分布である。また図-2は、 y/h , y/u_s を用いて片対数紙上に流速分布を示したものである。図-2の直線を外挿して $u=0$ となる位置を求め、これを基準面の高さ Δh_2 とする。 Δh_1 と Δh_2 を集中度に対してプロッ

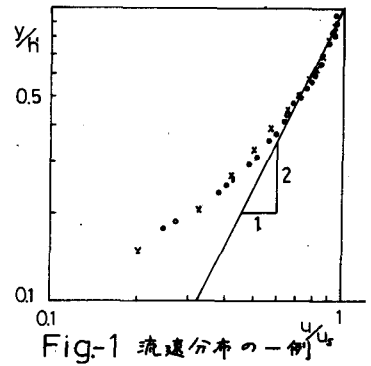


Fig-1 流速分布の一例

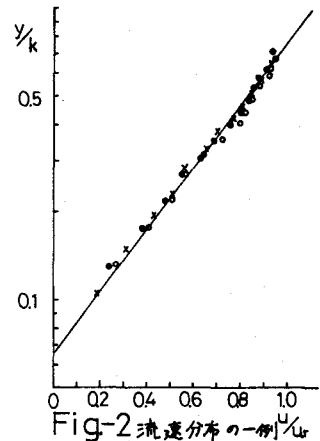


Fig-2 流速分布の一例

としたものが図-3である。 Δh_2 の値はすべて Δh_1 の上であり、 Δh_1 と Δh_2 の差は本実験範囲では各集中度で同程度であった。

(2) 摩擦抵抗係数 f の値について

水深 h_1 と単位幅流量 q を用いて摩擦抵抗係数 f を Re に対してプロットした一例が図-4であり、同様のことを h_2 について行ったものが図-5である。ここに、 $h_1 = h - \Delta h$ 、 $h_2 = h - \Delta h_2$ であり、 $Re = q/\nu$ とおけば、相対粗度 k/h_1 、 k/h_2 の増加に伴って、 $f = 96/Re$ の直線より上方で平行な直線群となる。今、 $f - Re$ 関係を $f = k/Re$ で表わし、 C と k/h_1 、 k/h_2 による k の変化を示したものが図-6、図-7である。

図-6によれば、 $C = 0.377$ の場合に k は顕著に大きな値をとることは、Phelpsの研究と符合する。一方、図-7では、 k/h_2 の増加による k の増加、また、集中度による相異は、 k/h_1 の場合に比してきわめて小さくなる。

また、 h_1 、 h_2 による f をそれぞれ f_1 、 f_2 として勾配別にプロットしたものの一例が図-8である。 f_2 はほとんどのケースで層流抵抗則： $f = 96/Re$ の直線に平行となった。

(3) 層流抵抗則との対応

薄層流では、水路底面を基準面とした場合は勿論、上述のような基準面を設定しても、 f の値は $96/Re$ より大きくなる。いま、次のように仮定する。

(i)境界せん断力が潤辺に作用し、その力の総和が抵抗となる。(ii)潤辺は基準面上の粗度のない部分の面積と、その面より上の球の部分の表面積の和である。このことを模式的に表わしたのが図-9である。

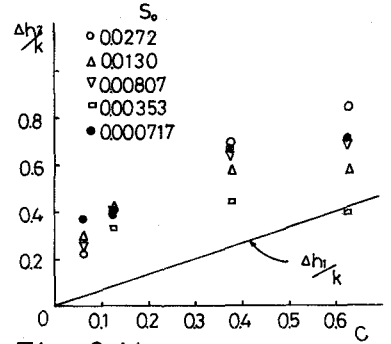


Fig-3 Δh_2 について

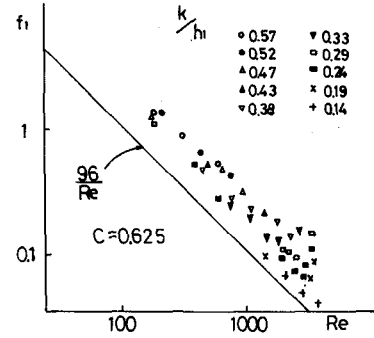


Fig-4 $f_1 \sim Re$ 関係

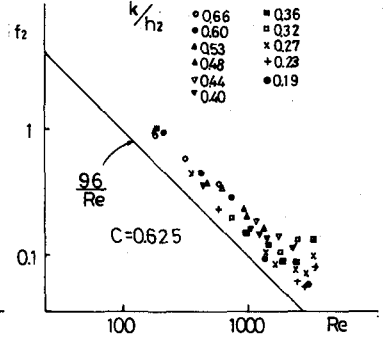


Fig-5 $f_2 \sim Re$ 関係

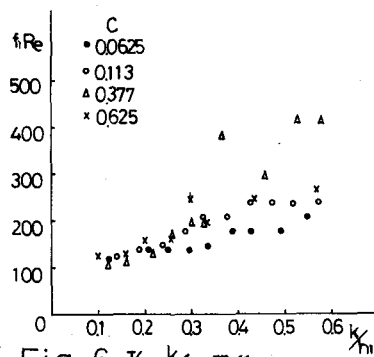


Fig-6 $k \sim kh_1$ 関係

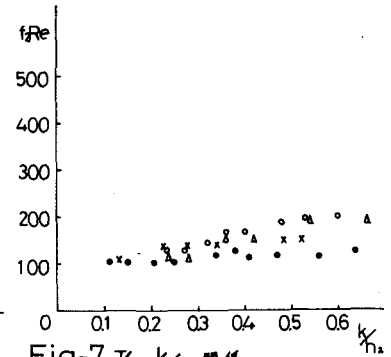


Fig-7 $k \sim kh_2$ 関係

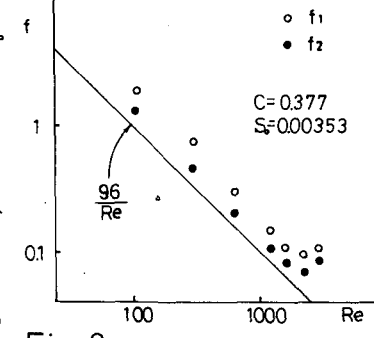


Fig-8 f_1 と f_2 の比較

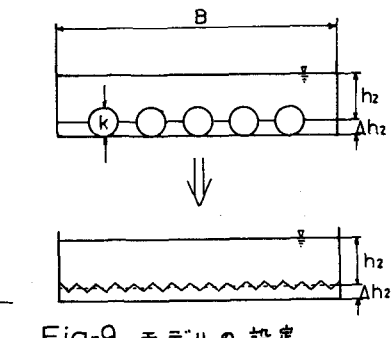


Fig-9 モデルの設定

この仮定によれば、水路幅を B とすると、潤辺: $P = B[1 + 4C(\Delta h_2 - k)^2/k^2]$, 流水断面積: $A = Bh_2$ であるから、 $\tau P = P \cdot gAS_0$, $\tau = f\rho u^2/8$ より、 $f = 8gS_0 h_2^3 / g[1 + 4C(\Delta h_2 - k)^2/k^2]$ で表わされる。ここに、 g は単位幅当りの流量。この式より得られた f の値を集中度別にプロットしたものが、図-10, 11, 12, 13 である。実験値は $f = 96/Re$ の直線に接近し、また勾配、相対粗度による差も少ない。この結果から、薄層流の抵抗則を統一的に把握する上で、上述のような流れのモデル化は、かなり妥当なものと考えられよう。

(4) 限界レイノルズ数について

実験値が $f = K/Re$ より上方に逸脱する点でのレイノルズ数 Re を限界レイノルズ数 Rec とし、 Rec を集中度別に相対粗度に対してプロットしたものが図-14 である。 Rec は相対粗度の増加とともに減少し、集中度による変化はほとんど認められない。

あとがき

薄層流において、水渠基準面の設定と摩擦抵抗の仮定によって求められる抵抗係数の値について検討したが、今後はさらに多種の粒径、粒子形状について実験を重ねていきたい。最後に、本研究において有益な御助言を賜った神戸大学工学部、笹源亮教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Phelps H. O. : Friction coefficient for laminar sheet flow over rough surfaces; Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, 59, Mar., 1975.
- 2) Phelps H. O. : Shallow laminar flows over rough granular surfaces; ASCE, HY3, 1975.
- 3) Woo, D. C. and E. F. Brater : Laminar flow in rough rectangular channels; J. Geophys., 66, No. 12, 1961.

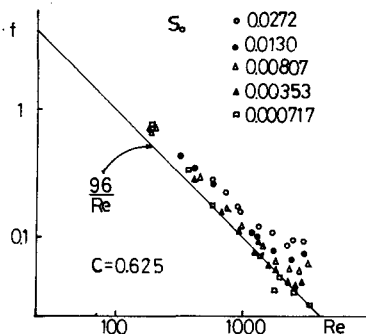


Fig-10 $f \sim Re$ 関係

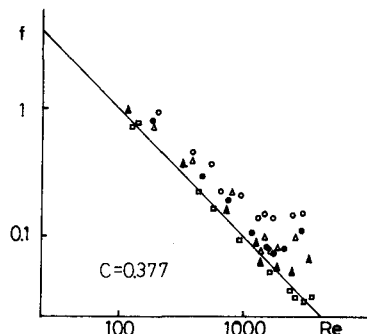


Fig-11 $f \sim Re$ 関係

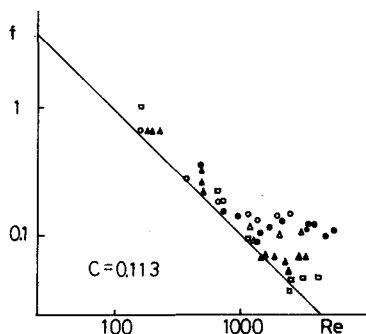


Fig-12 $f \sim Re$ 関係

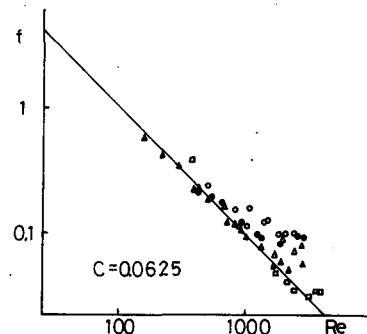


Fig-13 $f \sim Re$ 関係

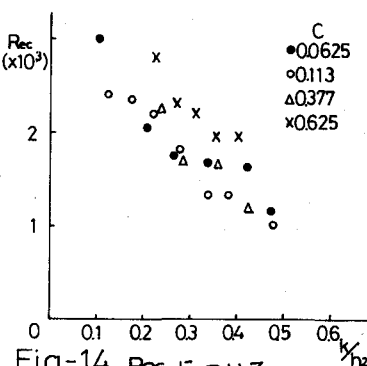


Fig-14 Rec について