

気ほうを含んだ水流の圧力損失について

西 山 壮 一

1. はじめに

農業用水では他目的の水に比べ水質等の点で違い管内に土砂などの堆積が多い。またかんがい期と非かんがい期があるために空気の混入が多い。特に通水開始時に管内に残っている空気のため定常状態になるのに時間が長くかかったり、管が地形の高低により曲がる場合、頂部に空気が残ったりして損失水頭の原因となったりする⁽¹⁾。また気ほうを含むと水だけ流れる場合より圧力損失は大きくなったりし、管水路内の空気についてはまだまだ判然としないものがある。管水路内を流れる水の抵抗を予測することはパイプラインの設計上重要な問題で多くの技術者の間で関心事であった。管水路の抵抗法則については従来から多く研究されている。近代的な管水路の抵抗則は Darcy-Weisbach の式の中のまさつ係数が変数であることが示され、さらに Moody 図をはじめとして、抵抗則を一般化し、図式化したものが発表されてからであろう。管水路内を水だけ流れる場合まさつ係数は一般に壁面の粗度とレイノルズ数の関数である。管水路内に空気が混入した場合、まさつ係数は空気の浮力のため管が水平となす角度、水と空気の流量比、それぞれの流量、管径等の組合せにより複雑に変化するものと考えられる。従って空気が混入した場合は水だけ流れるときのように統一的に表わせるとは考えられない。このような流れは現象が複雑であるために理論的にとりあつかうのは困難である。このような研究は他の分野でも研究されるようになったが、空気の含有率が多くて管径が小さい場合をとりあつかっている。この論文では水平な流れで空気流量が少ない場合の圧力損失について実験的に研究し、いろいろの方法で得られたデータを整理した。実験は管径 50 mm, 75 mm の 2 種類について行なった。

2. 記号および基礎量の説明

(a) 記号の説明

D : 管 径

L : 管の長さ

A : 管の断面積

Q_i : 水の体積流量

Q_a : 空気の体積流量

Q_m : 水と空気の混合流の体積流量

V_i : 水だけが流れた場合の管内平均流速

V_a : 空気だけが流れた場合の管内平均流速

V_m : 水と空気の混合流の管内平均流速

V : 流体の管内平均流速

P_i : 水だけが流れた場合の圧力損失

P_a : 空気だけが流れた場合の圧力損失

P_m : 水と空気の混合流の圧力損失

ρ : 流体の密度

ρ_l : 水の密度

τ_l : 壁面での水のせん断応力

τ_a : 壁面での空気のせん断応力

τ_m : 壁面での水と空気の混合流のせん断応力

τ_0 : 壁面での流体のせん断応力

f_l : Darcy-Weisbach 式の中の水のまさつ係数

f_a : Darcy-Weisbach 式の中の空気のまさつ係数

f_m : Darcy-Weisbach 式の中の水と空気の混合流のまさつ係数

α : 空気の含有率

ν_l : 水の動粘性係数

ν_a : 空気の動粘性係数

μ_l : 水の粘性係数

γ_l : 水の比重量

γ_m : 水と空気の混合流体の比重量

R_0 : レイノルズ数

l : プラントルの混合距離

r : 管の中心よりの距離

a : 比例定数

E : 脈動エネルギー

C : 無次元の定数

x : 指 数

y : 指 数

(b) 基礎量の説明

空気の流量が少ない場合で水と空気は一樣に混合していて相対速度はないとする。水および空気の体積流量をそれぞれ Q_i, Q_g とするとき V_i, V_g は次のように表わされる。

$$V_i = Q_i / A$$

$$V_g = Q_g / A$$

従って水と空気の混合流の平均流速は

$$V_m = (Q_g + Q_i) / A = V_i + V_g$$

空気の含有率は

$$\alpha = Q_g / (Q_g + Q_i)$$

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。

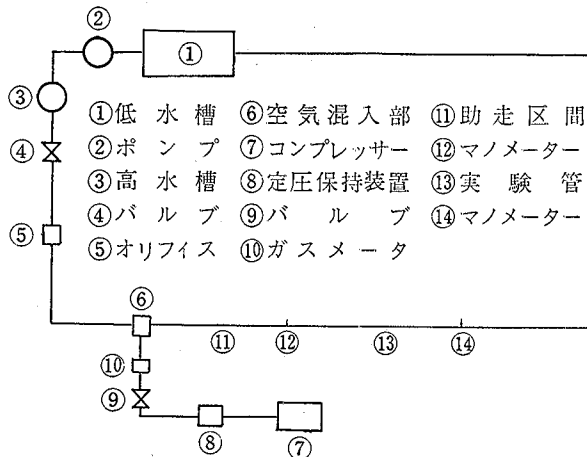


Fig. 1 実験装置概要図

水は①の低水槽より②のポンプで揚水され③の高水槽に達し、高水槽とパイプが接続している。水の流量は④のバルブで調節され、⑤のオリフィスで測定される。一方空気は⑦のコンプレッサーより送られ⑧の定圧保持装置で定圧となり⑨のバルブで空気の流量調節が行なわれ⑩のガスメーターで流量が測定され⑥の空気混入部に達する。これは Fig. 2 に示すように二重管になっていて内管の方に小さい孔が多くある。

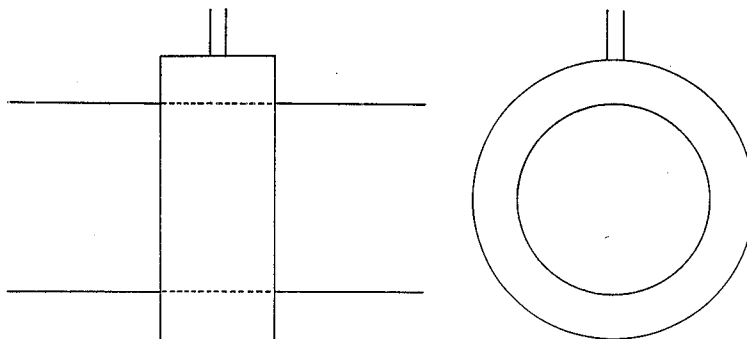


Fig. 2 空気混入部

気水混合の状態で助走区間 ⑪ を流れ実験管 ⑬ を流れる。圧力は ⑬, ⑭ のマンメータで測定される。マンメータの孔は 1.5 mm とした。取付部分を Fig. 3 に示す。

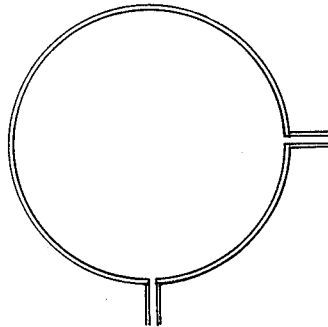


Fig. 3 マノメータの取付部分

75 mm 管を使っての実験については非常に高い高水槽を必要とするのでポンプより直接送った。ポンプとオリフィスの間で圧力の調節を行なった。

実験に使った管のまさつ係数の検定を Fig. 4 に示す。50 mm 管の方はほとんどブラジウスの式に従う。75 mm 管の方はわずかに離れているが後の計算では便宜上ブラジウスの式に従うとして計算した。空気についても同様に計算した。

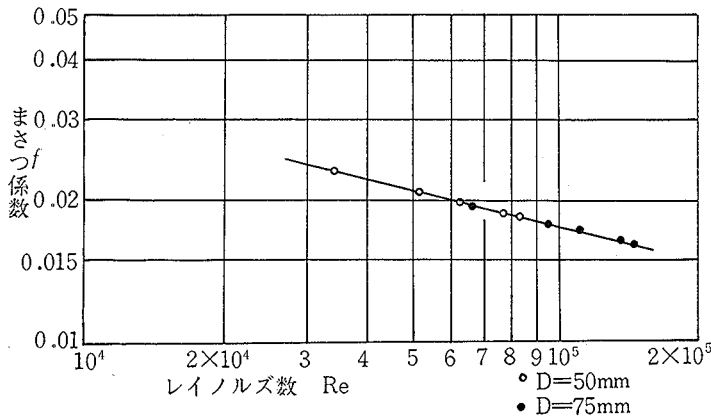


Fig. 4 管まさつ係数の検定

助走区間は 50 mm, 75 mm 管それぞれ管径の 130 倍, 200 倍とった。空気の流量の比が少なかったので十分であると思われる。

水と空気の流量をそれぞれかえたり、水の流量を一定にして空気流量だけかえて実験した。実験の測定範囲は表-1 のとおりである。

表-1 測定範囲

	50 mm	75 mm
V_l (m/s)	0.78	2.50
V_g (m/s)	0.18	0.38

4. データの整理および考察

(a) Wallisの式⁽²⁾による整理

Wallis は次のような関係式を得ている.

$$\frac{P_m}{P_l} = 1 + n \frac{Q_g}{Q_l} \quad (1)$$

管のまさつ係数についてはブラジウス式より計算し, P_l は以下のように計算した.

- 水だけ流れる場合の流速 $V_l = Q_l / A$
- レイノルズ数 $Re = V_l \cdot D / \nu_l$
- まさつ係数 $f_l = 0.3164 Re^{-0.25}$
- 圧力降下 $P_l = f_l \frac{L}{D} \frac{V_l^2}{2g} \cdot \gamma_l$

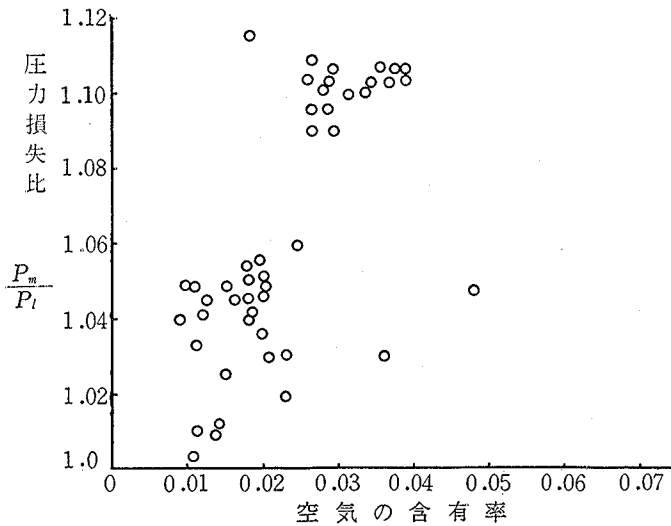


Fig. 5 空気の含有率と圧力損失比の関係 ($D=50$ mm)

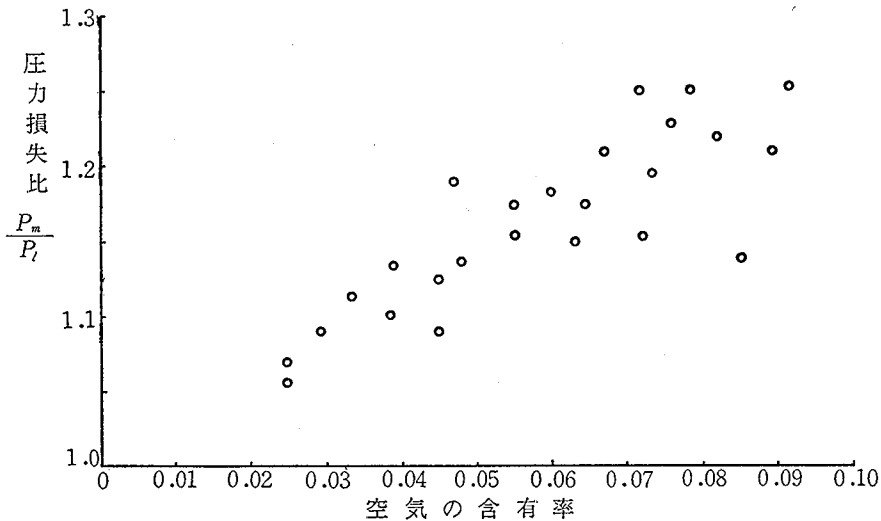


Fig. 6 空気の含有率と圧力損失比の関係 ($D=75$ mm)

P_m, Q_1, Q_2 は実験より得られる。このようにして整理した結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す。式 (1) について n を決めることはデータのバラツキが大きくて困難であるがだいたい 2~3 である。バラツキの原因としては気ほうは常に合体したり、分離したりしているためと考えられる。

(b) 空気の含有率と混合流のまさつ係数の関係について

管水路内を水だけ流れる場合、管の長さ L の両端の水頭の差を h_f とすると次の Darcy-Weisbach の式が成り立つ

$$h_f = f_l \frac{L}{D} \frac{V_l^2}{2g} \tag{2}$$

管まさつの係数については滑らかな管ではブラジウスの式、ニクラゼの式等があり、それぞれ適用範囲がある。滑らかな管の場合まさつ係数はレイノルズ数の関数である。空気が混入した場合、水と空気の相互作用による圧力降下も考えられるがこれもみかけ上管まさつ係数に含めて考えて水と空気の混合流の管まさつ係数を次式から計算する。

$$P_m = f_m \frac{L}{D} \frac{V_m^2}{2g} \gamma_m \tag{3}$$

(3) 式の f_m はいろいろの要因により変化すると考えられる。水と空気の相互作用による圧力降下は空気の含有率および水と空気のかくらの程度が考えられ、後者は流速によると考えられる。(気ほうの大きさは測定困難で気ほう径が小さいときは大きさは影響しないと仮定する)。滑らかな管での水と空気の混合流について圧力降下は次式の右辺のようなことが影響すると考えられる。

$$P_m = F(\rho_l, \mu_l, L, V_l, D, \alpha) \tag{4}$$

次元解析より

$$P_m = C \frac{\rho_l L V_l^2}{D} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l V_l D} \right)^x \alpha^y \tag{5}$$

(3) 式と (5) 式より滑らかな管で気ほうを含んだ場合のまさつ係数は

$$f_m = F(R_e, \alpha) \tag{6}$$

水の流量だけ一定にしてすなわち R_e を一定にし、空気の流量だけかえて実験して得られたデータを整理したものを Fig. 7 に示す。

データのバラツキは大きいと同じ水の流量では空気の含有率が多くなるにつれて (3) 式で定義されるみかけ上のまさつ係数も大きくなる傾向にある。このことは水と空気の相互作用のため圧力降下が大きくなったものと考えられる。

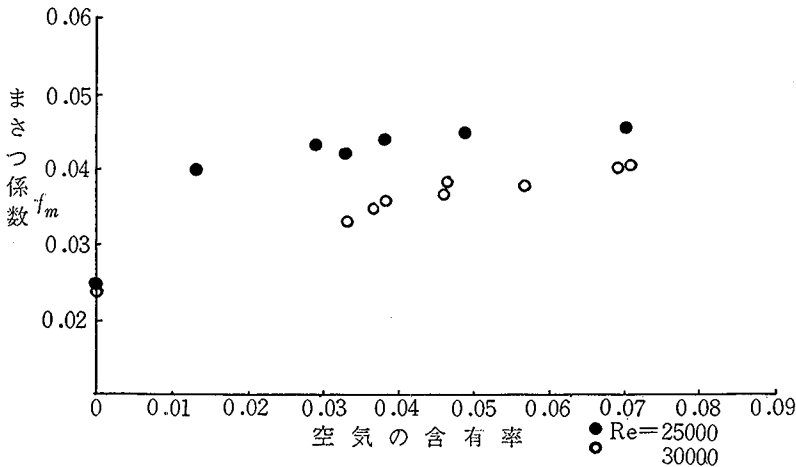


Fig. 7 まさつ係数と空気の含有率の関係

(c) 均質流による理論値と実験値の比較について

空気は管内に一様に分布して水と空気の相対速度は速度分布以外にはないとする。また速度分布は水だけ流れる場合と変わらないと仮定する。

壁面におけるせん断応力は水によるものと空気によるものがある。従って

$$\tau_m = \tau_g \alpha + \tau_l (1 - \alpha) \tag{7}$$

流体の管まさつ係数と壁面におけるせん断応力の関係は

$$\tau_0 = \frac{\rho f V^2}{8} \tag{8}$$

水と空気の混合流の平均密度と同じ密度をもつ仮想上の水と空気が流れたとすると

$$f_m = f_g \alpha + f_l (1 - \alpha) \tag{9}$$

従って f_m, f_l は次式から計算できる

$$f_l = 0.3164 R_{el}^{-0.25}$$

$$f_g = 0.3164 R_{eg}^{-0.25}$$

ただし

$$R_{el} = \frac{V_m D}{\nu_l}, \quad R_{eg} = \frac{V_m D}{\nu_g}$$

このようにして得られた f_m より混合流の圧力降下は (3) 式より求まる。このようにして求めた値と実験との比較を Fig. 8, Fig. 9 に示す。

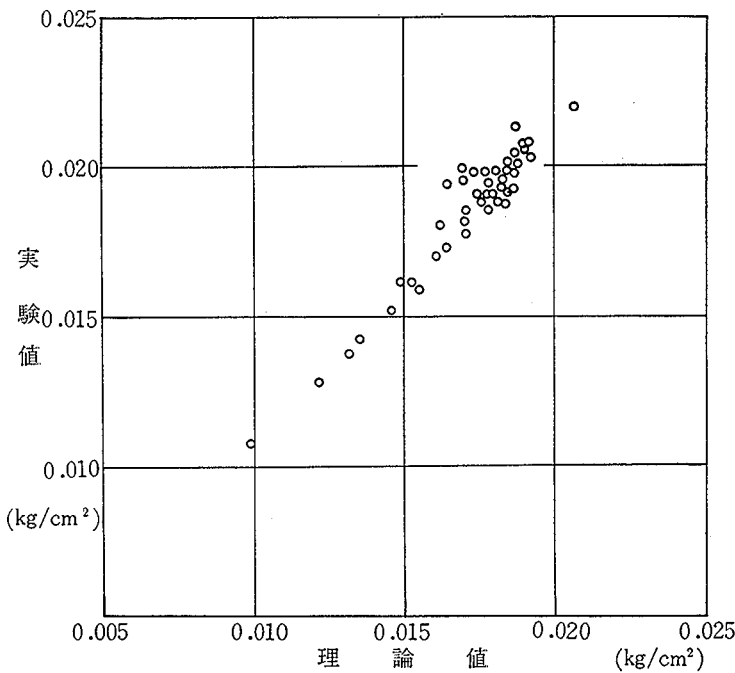


Fig. 8 理論値と実験値の比較 (D=50 mm)

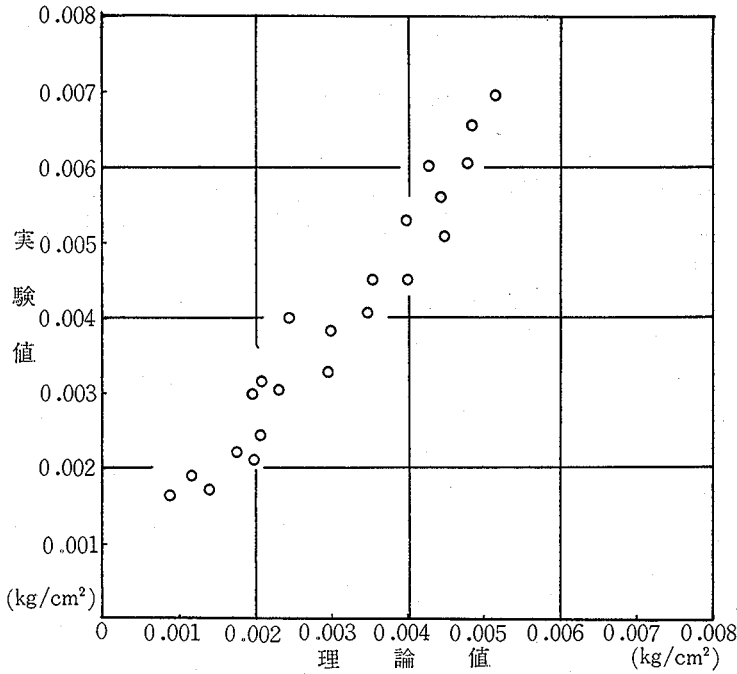


Fig. 9 理論値と実験値の比較 (D=75 mm)

いずれも実測値の方が大きいこれは水と空気の相互作用が大きな原因と考えられる。

A. ZAGASTIN と K. ZAGASTIN⁽³⁾ は円管の乱流の脈動エネルギーに対して次式を示している。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dl}{dr} \right) + aE = 0$$

空気が混入した場合、水と空気の相互作用により脈動が一層はげしくなり、それにもとづく圧力損失がある。またこのような脈動は振動の原因となったりする。これらは非常に複雑であるがこれらを見捨て平均的にとりあつかうには理論的に無理があるように思われる。

この研究の一部は筆者の修士論文の一部であるが御指導を賜った、九大・田辺教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 田辺, 野村, 板東, 長: 農業部門における管水路の利用開発に関する基礎的研究 (I), 管水路の空気混入流に関する既往の研究とその考察, 農業土木学会九州支部講演集 120~121 (1967).
- (2) 石谷, 中西: 気液二相流研究の手法, 混相流シンポジウム講演前刷集 1~10 (1967).
- (3) A. ZAGASTIN and K. ZAGASTIN: Analytical solution for turbulent flow in pipes, LA HOUILLE BLANCHE, 113~118(1969).

Studies on the pressure drop of water containing the air bubbles

Souichi NISHIYAMA

There are many sedimentation of soil and sand in agricultural pipe lines compared with other objects of water utilization and in water utilization for agriculture, there is non-irrigation season, therefore much air inlet in pipe lines.

On account of these air, additional head losses occur on pipe lines. Over the years, there are many resistance formulas for pipe lines. The modern resistance relations are based on the variable coefficient of f in the Darcy-Weisbach equation. Friction factor is function of wall roughness and Reynolds number in case of flowing water only. If water contains the air bubbles, we think that friction factor is various complexly combination of the direction of flow because of bouyancy, discharge of air and water, and diameter of pipe.

Therefore in case of flowing air and water, there is no general unified method of resistance formula.

In this paper, we experimented using the diameter of 50 mm, 75 mm, air content was relatively small and direction of flow was horizontal.

We plotted the data by Wallis-method, dimensional analysis and compared with homogeneous theory and experimental results.

They are shown in Fig. 5-9.

(1971年11月30日 受理)