粗面壁管内空気－水二相流の摩擦損失*

賞 雅 寛 而**

Friction Loss of Air Water Two-phase Flow in Rough Wall Tubes

by Tomoji Takamasa

Friction loss of rough wall tubes is significant for design of marine piping system. The author has performed an experimental study on friction loss of air-water two phase flow with vertical rough wall test tubes. The objective of the work is to obtain an empirical equation of friction loss of two phase flow in rough wall tube with a new arrangement method. Three empirical equations of friction loss have been obtained in the region of gas quality $\chi=10^{-5}-10^{-2}$. The friction loss of two phase flow in rough wall tube is arranged well with a factor $F=Re_i K^n \chi^m$. Re_i is Reynolds Number and K is a wall roughness factor. The exponent m is $1/4$ and n is $1/3$, $1/9$ and $1/46$ in the range of $\chi=10^{-3}-10^{-2}$, $10^{-4}-10^{-3}$ and $10^{-5}-10^{-4}$, respectively. The result of Chisholm who used horizontal rough wall tubes is also arranged well with the factor. The effect of gas flow rate on the friction loss of two phase flow in rough wall tube is almost as same as that in smooth wall tube.

1. 序

船用機関などの動力プラントにおける管系において生じる摩擦損失は、ポンプ動力などの算出及び熱伝達率などの評価の上で、重要な要素である。円滑管の液相もしくは気相の単相流については、過去に相当多くの実験結果があり、工学的にはかなり良く整理されている。実際の管表面ではスケールの付着などで粗面になり、さらに流動も蒸気泡の混入のために気液二相流になる場合も多い。円滑管における気液二相流の摩擦損失については、LM相関¹⁾をはじめとして多くの研究があり、計算方法も確立されている。これに対して粗面壁の気液二相流における摩擦損失については、Chisholm²⁾や勝原³⁾などの実験結果の報告があるが、これらの報告では実験式を完全には整理しておらず、一般的な計算方法は示していない。また単相流摩擦損失実験でもそうであ

るのだが、粗面壁管の粗さの評価は各研究者によってまちまちである。これは、砂を塗布したような粗面壁であると粗さ密度にばらつきができてしまうためである。例えば、代表的な粗面壁管摩擦損失係数の実験式であるプラントル・ニコラゼの式とミーゼスの式では、同じ壁面粗さの値でもかなり異なる大きさの摩擦損失が出てしまう⁴⁾。

本研究では、壁面粗さを均一にするためにエメリクロスを管内に張り付けた粗面壁管を用いた液単相流及び空気－水系の気液二相流について摩擦圧力損失の実験結果を行った。ここで、単相流の摩擦損失は摩擦損失係数を求める方法、また二相流摩擦損失はLM相関を基に求める方法が一般的である。しかしながら粗面壁管気液二相流の摩擦損失において、粗面摩擦損失係数とLM相関の両方を考慮して一般的な実験計算方法を求めようとするとかなり複雑な計算手順を踏まなければならない。実用的ではない。本研究では、気液流量と壁面粗度を関数にした粗面壁管内気液二相流の摩擦損失式を次元解析法で直接求めることにした。ここに粗面壁管内気液二相流摩

*原稿受付 平成6年3月10日

**正会員 東京商船大学助教授(江東区越中島2-1-6)

表 1 粗さの実験条件

JIS #	Smooth	#320	#180	#100	#30
e (mm)	0	0.058	0.115	0.20	0.82
D_e ($\times 10^{-2}$ m)	2.51	2.35	2.35	2.36	2.28
K ($\times 10^{-3}$)	0	2.47	4.89	8.48	35.9

表 2 液流量の実験条件

Re_l	10,000	20,000	30,000	40,000
U_{l0} (m/s)	0.4	0.8	1.2	1.6

表 3 気相流量の実験条件

Q_a (l/min)	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0
U_{a0} (m/s)	0.017	0.035	0.067	0.17	0.34	0.68	1.7

$$\chi = 1.1 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-3}$$

図 1 実験装置

擦損失の実験結果、次元解析による実験式及び実験式の妥当性を他の実験研究と比較検討した結果を報告する。

2. 実験装置

図 1 に実験装置を示す。実験は、気液相として常温大気圧の空気・水を用いて行った。水はポンプを出ると差圧式の流量トランスミッター、気水混合部、テスト部を上昇し、サージタンクへ戻る。空気は、コンプレッサーから減圧弁、浮子式流量計、気水混合部を通過後、テスト部を上昇し、気水分離器で大気へ開放される。気水混合部の気泡発生装置は、4本の外径20mm（内径16mm） $\times$ 40mmの焼結金属管（透過孔 $1.5\mu\text{m}$ ）から成っている。空気流量は流量計出口の流量制御弁で調整され、流量計の内部は、出入口に備えられた整圧弁により3気圧に保たれている。テストチャンネルは内径25mmの塩化ビニール管で作られている。テスト部の両端にシャットオフ弁があり、これらを急速遮断することによりテスト部の平均ボイド率が求められる。テストチャンネルの上流部は、長さ1220mmの円滑管からなる導入部であり、その下流に長さ2895mmの粗面壁管からなるテスト部がある。テスト部の粗さは、JIS-R6001のエメリークロスロールを貼り付けた管を交換することによって変えることができる。この貼り付けられるエメリークロスの幅と長さは、それぞれ管周とテス

ト部長さに一致しており、従って管円周方向にわたる継目はない。差圧測定用の静圧孔は、内径0.2mmのステンレス管を用いて、テスト部の両端から106mm（静圧孔間2682mm）の部分に設置した。静圧孔間の差圧は、実験条件によって測定レンジが10, 50 KPaの2つの差圧変換器を使い分けて測定した。測定された差圧信号は、デジタルメモリーに記憶された後、パーソナルコンピューターに記録される。表 1 に壁面粗さの実験条件を示す。粗面の突起高さ e は、エメリークロスと同じ規格であるJIS-R6001の研磨粒子を顕微鏡で測定した平均径⁵⁾を用いた。各テスト管の有効直径 D_e はエメリークロスの粒子体積とシート厚さによって僅かではあるが小さくなる。この D_e は、測定された管水容積をテスト部長さで除して求められる。相対粗度 K は $K = e/D_e$ で表わされる。表 2 に液流量の実験条件を示す。液レイノルズ数 Re_l は、水の流速 u_{l0} と管径 25mm から求められる。表 3 に気相流量の実験条件を示す。クォリティ χ は空気流量によって変わるが、 $1.1 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-3}$ の範囲にある。本実験とほとんど等しい内径26mmの垂直円滑管を用いて世古口によって観察された流動様式図⁶⁾に本実験の気液流量条件を重ね合わせると図 2 のようになる。管壁粗さに流動様式は変わるかも知れないが、ほぼ気泡流、スラグ流及びフロス流の範囲にあることがわかる。

図2 流動様式と気液流量条件

図3 粗面壁管の摩擦損失係数

全圧力損失 ΔP_T は、実験条件によって測定レンジが10, 50 KPaの2つの差圧変換器を使い分けて測定した。実験結果の確認と差圧変換器の校正のために水マノメーターを用いた実験を行ったが、空気流量が多くなるとマノメーターに空気が混入するため、クオリティ $\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 単相流摩擦損失係数 単位長さ当りの液単相流の摩擦損失 ΔP_l (Pa/m) は、摩擦損失係数 f_l を用いて次式のように表される⁷⁾。

$$\Delta P_l = 2 \frac{f_l}{D_e} \rho_l u_{l0}^2 \quad (1)$$

表4 液単相流摩擦損失係数 (f_l (P. N) はプラントル・ニコラゼの摩擦損失係数)

	$K \times 10^{-3}$	$f_l \times 10^{-3}$	$f_l(P.N) \times 10^{-3}$
Smooth	(1.27)	6.12	5.18
#320	2.47	9.07	6.17
#100	8.48	15.74	8.39
#30	35.9	25.24	15.36

図3に本実験で測定された単相流の摩擦損失係数 f_l と液レイノルズ数 Re_l の関係を示す。図中の2本の直線は、円滑管における層流域の理論摩擦係数(2)と乱流域のブラジウスの実験式(3)である。

$$f_l = 16/Re_l \quad (2)$$

$$f_l = 0.079 Re_l^{-1/4} \quad (3)$$

報告されている実験結果⁸⁾と同様に、それぞれの粗さの摩擦係数の値は、液レイノルズ数の増加と共に一定値になる。この f_l ($Re_l = 5 \times 10^3$ から 5×10^5 までの平均値) とプラントル・ニコラゼの粗面壁管液単相流摩擦損失係数式(4)⁴⁾と比較した結果を表4に示す。

$$f_l = \{2.28 - 4 \cdot \log(K)\}^{-2} \quad (4)$$

表4において、円滑管における見掛けの粗度 $K_s = 1.27 \times 10^{-3}$ は、 $Re_l = 5 \times 10^3$ から 10^5 までのほぼ中間値 3×10^4 を、円滑管の見掛け粗さを求める式(18)に代入して求めた。同じ粗度 K にたいして、本実験結果の方が、摩擦損失係数が多い。これは、プラントル・ニコラゼの実験で用いられた砂を塗布した摩擦管に対して、本実験で用いたエメリクロス管の方が粗粒子密度が大きく、かつ均一であるためだと考えられる。同じ突起高さであっても粗粒子密度が異なると摩擦損失係数が変わる事についてはいくつかの報告がある⁸⁾。次に管壁粗さと液流量をパラメーターとした粗面壁管液単相流の摩擦損失の実験式を次元解析法で求める。次元解析のやり方は、指数を分数形にして各パラメーターによる一つのファクターを求める整理方法⁹⁾を用いた。この方法は、ファクターを用いるために関数を整理しやすいこと及び各パラメーターが関数に与える影響を比例的に示せるという特徴がある。分数形表示による一次近

図4 液单相摩擦損失とファクター $F_o = Re_i \cdot K^{1/4}$

図5 液单相摩擦損失とファクター F_o (マノメーター計測)

似式の誤差もしくは標準偏差は、実数形で表す次元解析法に比較して大きくなるが、その差は大きなものではない。パラメーターの変数は、管壁粗さについては粗度 K を、液流量については、液の見掛けのレイノルズ数 Re_i をそれぞれ用いた。単位長さ当りの单相流摩擦損失 ΔP_i (Pa/m) は、大気圧 Pa と管径 D_e により無次元化される。

$$P_i^* = \Delta P_i / Pa \cdot D_e \quad (5)$$

円滑管の見掛けの粗さ K_s は、式(8)より、 Re_i が 1×10^4 、 2×10^4 、 4×10^4 の時、それぞれ 2.77×10^{-3} 、 1.70×10^{-3} 、 1.04×10^{-3} になる。以後円滑管の見掛けの粗さ K_s については、この値を使用する。摩擦損失は、管壁粗さ及び液流量の増大によって大きくなるので、粗面壁管单相流摩擦損失を次のように仮定する。

$$\Delta P_i^* \propto Re_i \cdot K^m \quad (6)$$

式(6)が線形になるように最小二乗法を用いて K の指数 m を求めた結果、図4に示すように $m = 1/4$ の時に最も良く整理された。図4の一次近似式は、式(7)で表される。

$$\Delta P_i^* = 1.82 \times 10^{-13} \cdot F_o^{2.13} (F_o = Re_i \cdot K^{1/4}) \quad (7)$$

次にマノメーター計測の液单相流摩擦損失を同様に $F_o = Re_i \cdot K^{1/4}$ を用いて整理した結果を図5に示す。差圧計測結果と同様に、測定された摩擦損失は式(7)で良く整理されることがわかる。次に代表的な粗面壁管液单相流摩擦損失の実験式であるプラントル・ニコラゼ及びミーゼスの式と本実験で得られた実験式(7)を比較検討する。粗面壁管の液单相流摩擦損失は、式(1)とプラントル・ニコラゼの摩擦係数式(4)より、

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= 2 \frac{f_i}{D_e} \rho_i u_{i0}^2 = 2 \frac{\nu^2}{D_e^3} \rho_i f_i Re_i^2 \\ &= 2 \frac{\nu^2}{D_e^3} \rho_i \{2.28 - 4 \cdot \log(K)\}^{-2} Re_i^2 \end{aligned} \quad (8)$$

上式は、粗度 K の効果を対数をもって表しているので、指数をもってその効果を表したファクター F_o 及び式(7)と直接比較できない。従って、式(8)に本実験と同様に管径 $D_e = 25$ mm、空気・水の物性値を代入した後に適当な値の粗度 K (ここでは、本実験とはほぼ同じ範囲の粗度 $K = 0.002 \sim 0.05$) に対し試算をして、ファクター F_o 及び式(7)と比較することにした。計算された液单相流摩擦損失 ΔP_i をファクター F_o でもって整理した結果を図6に示す。粗さが小さいときには線のばらつきが大きい、粗さが大きくなるにつれて一本の線に収束することがわかる。これを平均した一次近似式は、

$$\Delta P_i^* = 3.75 \times 10^{-13} \cdot F_o^2 \quad (9)$$

図5の直線 (A) は、式(9)を表している。プラントル・ニコラゼの式においても粗さが大きくなると F_o で整理できることから、実験結果が F_o で良く整理できたのは、プラントル・ニコラゼが用いた砂粒塗布による粗面よりも本実験のエメリークロスによる粗面の粗さ密度が大きく、同じ粗度でも大きい摩

図6 プラントル・ニコラゼの式とファクター F_0 。

摩擦損失を生じ、 F_0 でまとまりやすい領域にあったと考えられる。このことは図5において、同じファクター F_0 に対し、本実験の摩擦損失の値が、式(9)よりもかなり大きい値になっていることから推察できる。またプラントル・ニコラゼの式は、次のように簡化できる。

$$f_l = 2 (0.139)^2 K^{0.3} \quad (10)$$

式(8)から、

$$\Delta P_L \propto f_l Re_l^2 \quad (11)$$

式(5)及び(10)を代入して、

$$\Delta P_L^* \propto K^{0.3} Re_l^2 \quad (12)$$

従って、一般的にプラントル・ニコラゼの式は、ファクター $Re_l \cdot K^{0.15}$ で整理できることがわかる。

プラントル・ニコラゼの摩擦損失式と同様に一般的に用いられているミーゼスの式は、

$$f_l = 1.43\sqrt{K} + 2.43 \times 10^{-3} + \sqrt{0.143/Re_l} \quad (13)$$

第2項以下を省略すると、

$$f_l = 1.43\sqrt{K} \quad (14)$$

プラントル・ニコラゼの摩擦損失式の場合と同様に、式(14)と管径 $D_s = 25\text{mm}$ 、空気・水の物性値を式(1)に代入して整理すると、

$$\Delta P_L^* \propto (Re_l \cdot K^{1/4})^2 = F_0^2 \quad (15)$$

従って、ミーゼスの式を用いれば、本実験の実験

式(7)と同様に粗面壁管液単相流摩擦損失 ΔP_L は、ファクター F_0 で整理できることがわかる。

粗面壁管においては、一般的に突起高さ e が壁面の粘性底層の厚さを越えているが、 e が粘性底層より小さい場合には、流速分布もしくは摩擦損失を円滑管の場合と同様に考えることができる。従って円滑管における見掛けの粗さ、すなわち突起高さ e は、粘性底層の厚さを取ればよい⁴⁾。粘性底層の厚さは液流速すなわち液レイノルズ数 Re_l が大きくなると薄くなるので、一般的に円滑管における見掛けの突起粗さすなわち見掛けの壁面粗度は液レイノルズ数の増加につれて小さくなる。円滑管において式(1)にブラジウスの式(3)を代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= 2 \frac{f_l}{D_s} \rho_l u_{l0}^2 = 2 \frac{\nu^2}{D_s^3} \rho_l f_l Re_l^2 \\ &= 0.158 \frac{\nu^2}{D_s^3} \rho_l Re_l^{1.75} \end{aligned} \quad (16)$$

管径 $D_s = 25\text{mm}$ 、空気・水の物性値を代入して整理すると、

$$\Delta P_L^* = 2.55 \times 10^{-13} Re_l^{1.75} \quad (17)$$

円滑管における摩擦損失は式(17)で表されるので、本実験における粗面壁管摩擦損失実験式(7)から、円滑管における見掛け粗さ K_s は、

$$K_s = \left(\frac{2.55 \times 10^{-13} Re_l^{1.75}}{1.82 \times 10^{-13} Re_l^{2.13}} \right)^{4/2.13} = 1.92 Re_l^{-0.71} \quad (18)$$

3.2 二相流摩擦損失の実験式 二相流摩擦損失 ΔP_L は加速度項を0として、測定された全圧力損失 ΔP_T から重力項を引いて求められる。

$$\Delta P_L = P_T (1 - \alpha_m) \rho_l g \quad (19)$$

実験にあたっては、静止水が管内に満たされた状態、すなわち重力項が $\rho_l g$ があらかじめ掛かった状態を差圧0としているので、これを補正すれば、

$$\Delta P_L = \Delta P_T - \alpha_m \rho_l g \quad (20)$$

単相流摩擦損失実験と同様に、管壁粗さと気液流量をパラメーターとした粗面壁管気液二相流の摩擦損失の実験式の作成を試みた。気相流量のパラメー

図7 二相流摩擦損失 ΔP_t とファクター $F' = Re_t \cdot K^{1/4}$ ($Q_g = 2.0 \text{ l/min}$)

図9 二相流摩擦損失 ΔP_t とファクター $F_1 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ ($\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$)

図8 二相流摩擦損失 ΔP_t とファクター $F'' = Re_t \cdot \chi^{1/9}$

図10 二相流摩擦損失 ΔP_t とファクター $F_1 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ (マノメーター計測)

ターは、コオリティ χ を用いる。単位長さ当りの二相流摩擦損失 ΔP_t (Pa/m) は、大気圧 Pa と管径 D_t により無次元化される。実験結果の傾向から、

$$\Delta P_t \cdot * \propto Re_t \cdot K^m \chi^n \quad (21)$$

と仮定する。式(21)が線形になるように最小二乗法を用いて χ の指数 n を求めた結果、全実験範囲に共通する適当な指数 n は見いだせないことがわかった。従ってここでは χ が $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 及び $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の3つの範囲に分けて実験式の作成を試みた。実験結果を確認するためのマノメーター計測による実験がコオリティ $\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で行われているので、最初にこの範囲の粗面壁管壁気液二相流摩擦損失について検討する。まず粗度 K の指数 m であるが、ファクターを $F' = Re_t \cdot K^m$ において整理した結果、単相流と同様に $m = 1/4$ の時に最も良く整理された。図7にその1例が示される

ように、 ΔP_t は、空気流量別にそれぞれ直線で近似できることがわかる。次にコオリティ χ の指数 n については、 $F'' = Re_t \cdot \chi^n$ として、粗度 K 別に整理すると、図8に示すように $n = 1/9$ で良く整理できる。以上のファクターを F' 、 F'' をまとめたファクター $F_1 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ を用いて、 ΔP_t を整理すると図9のようになる。またこの一次近似式は、次式で表される。

$$\Delta P_t \cdot * = 3.87 \times 10^{-11} F_1^{1.75} \quad (22)$$

図10にマノメーター計測の粗面壁管二相流摩擦損失の整理結果を示す。差圧計と測定された摩擦損失は、式(22)で良く整理できることがわかる。次に χ が $10^{-3} \sim 10^{-2}$ と $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の場合について、同様に実験結果の整理を試みると、図11及び図12のように、それぞれファクター $F_2 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/3}$ と $F_3 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/48}$ で良く整理された。それぞれの

図11 二相流摩擦損失 ΔP_t^* とファクター F_2
 $= \text{Re}_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/3} (\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2})$

図12 二相流摩擦損失 ΔP_t^* とファクター F_3
 $= \text{Re}_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/46} (\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4})$

一次近似直線は次式で表される。

$$\Delta P_t^* = 3.31 \times 10^{-11} F_2^{2.15} (\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}) \quad (23)$$

$$\Delta P_t^* = 7.24 \times 10^{-12} F_3^{1.78} (\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4}) \quad (24)$$

3.3 Chisholmの実験結果との比較 式(22)~(24)によって、本実験の結果をうまく整理することができた。しかしながら本実験では特定の実験範囲でしか実験を行っていないので、他の研究者の実験結果を本実験と同様な整理方法を用いて整理し、式の妥当性を検討する。Chisholmは管径1インチの粗面壁水平管を用いて二相流摩擦損失を計測し、摩擦損失比 $\Delta P_t / \Delta P_l$ を次式のように整理した。

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_l} = 1 + \frac{C}{X^m} \quad (25)$$

図13 Chisholmの実験結果とファクター F_1
 $= \text{Re}_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9} (\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3})$

ここで、 X はLM (Lockhart-Martinelli) パラメーターである。係数 C , m について、Chisholmは、液流量及び粗度別のそれぞれの実験値に適合した値を示しているが、一般的な整理方法は提示していない。そこで、式(25)にしたがって、得られるChisholmの実験結果を、ファクター $F_1 = \text{Re}_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ で整理することを試みる。まず式(25)のLMパラメーターは、一般に次のように表される。

$$X = \left(\frac{1 - \chi}{\chi} \right)^{1-n/2} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{n/2} \quad (26)$$

ここで n は、管摩擦係数の指数なのでブラジウスの式の指数 $n=0.25$ を用いると、

$$X = \left(\frac{1 - \chi}{\chi} \right)^{0.875} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.125} \quad (27)$$

上式に大気圧、25℃の空気・水の物性値を代入すると、

$$X = 5.64 \times 10^{-2} \left(\frac{1 - \chi}{\chi} \right)^{0.875} \quad (28)$$

次に液单相流摩擦損失 ΔP_l を式(9)を用いて算出し、式(25)でChisholmの二相流摩擦損失 ΔP_t を計算する。図13は、得られた ΔP_t を $\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で、ファクター $F_1 = \text{Re}_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ を用いて整理した結果である。図よりChisholmの実験結果もファクター F_1 で直線上に良く整理されることがわかる。この直線は、次式で表される。

図14 Chisholmの実験結果とファクター $F_1 = Re_i \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$ ($\chi = 10^{-5} \sim 10^{-2}$)

図15 Chisholmの実験結果とファクター $F_2 = Re_i \cdot K^{1/4} \chi^{1/3}$ ($\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$)

$$\Delta P_t^* = 2.60 \times 10^{-12} F_1^{2.09} \quad (29)$$

図中に本実験で得られた実験式(29)を示す。これより本実験の結果は、Chisholmの実験結果とはほぼ同様な値を取っていることがわかる。以上のようにChisholmの実験結果も $\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲ではファクター F_1 で整理でき、かつその値も本実験の結果とはほぼ同じであることがわかった。しかし、Chisholmの実験結果を $\chi = 10^{-5} \sim 10^{-2}$ の範囲で表すと図14のようになり、 F_1 では表せられない部分が多くなる。図中の直線は式(29)であり、 $\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲ではほぼこの直線に合うことがわかる。同様に $\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ の範囲で、Chisholmの実験結果を整理し、適当な一次近似ファクターを求めることを試みる。粗度 K の指数は $1/4$ で良く近似できたので、次に χ の指数を最小二乗法で求めたとこ

図16 Chisholmの実験結果とファクター $F_3 = Re_i \cdot K^{1/4} \chi^{1/46}$ ($\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4}$)

ろ、本実験結果と同様に $1/3$ の時に最も標準偏差が小さくなった。従って、ファクター $F_2 = Re_i \cdot K^{1/4} \chi^{1/3}$ で整理すればその一次近似式は、

$$\Delta P_t^* = 2.17 \times 10^{-10} F_2^{1.83} \quad (30)$$

図15にChisholmの実験結果から計算された $\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ における ΔP_t と F_2 の関係を示す。次に、 $\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ の範囲で、Chisholmの実験結果を整理し、適当な一次近似ファクターを求めることを試みる。粗度 K の指数はやはり $1/4$ で良く近似できたので、 χ の指数を求めたところ、本実験結果と同様に $1/46$ の時に最も良く整理された。従って、ファクター $F_3 = Re_i \cdot K^{1/4} \chi^{1/46}$ でChisholmの実験結果を整理すればその一次近似式は、

$$\Delta P_t^* = 6.40 \times 10^{-11} F_3^{2.0} \quad (31)$$

Chisholmの結果から計算された $\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ における ΔP_t と ΔF_3 の関係を図16に示す。この考察により、Chisholmの実験結果も垂直粗面壁管を用いた本実験と同様にそれぞれのファクターで整理できることがわかった。それぞれの一次近似式には、係数に多少の差があるが、これは粗面粗さの評価の違い及び水平管と垂直管の流動様式の違いによるものであると考えられる。

3.4 LM相関との比較 本実験及びChisholmの実験結果で用いられたファクターの妥当性を、一般的な二相流摩擦損失式であるLM相関の比較により検討する。

円滑管の摩擦損失を表すLM相関は、

図17 LM相関と実験式における χ の影響

図18 ChisholmとLM相関との比較

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_i} = 1 + \frac{21}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (32)$$

の様に表される。この摩擦損失比 $\Delta P_t / \Delta P_i$ には液流量の影響が入らず、 χ のみの関数として表される。従って、粗度 K を一定もしくは Re_t の関数として、液流量を一定とすれば、ファクター F_1 、 F_2 、 F_3 の χ の指数をLM相関における χ の大きさと比較することができる。このように $Re_t \cdot K$ を一定とした時、摩擦損失比 $\Delta P_t / \Delta P_i$ を本実験結果より求めると、

$\chi = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の時、式(22)より、

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_i} = \text{const} \cdot F_1^{1.75} = \text{const} \cdot \chi^{1.75/9} \quad (33)$$

$\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ の時、式(23)より、

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_i} = \text{const} \cdot F_2^{2.15} = \text{const} \cdot \chi^{2.15/3} \quad (34)$$

$\chi = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ の時、式(24)より、

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_i} = \text{const} \cdot F_3^{1.78} = \text{const} \cdot \chi^{1.78/46} \quad (35)$$

式(33)～(35)のconstを適当に取り、LM相関の式(28)及び式(32)と比較した結果を図17に示す。図より、式(33)～(35)のクォリティ χ の傾きはそれぞれの範囲でLM相関をよく近似していることがわかる。以上の事より、クォリティすなわち空気流量が摩擦損失に及ぼす影響の傾向は、粗面壁管においても円滑管においてもほぼ同じであること及び摩擦損失の整理に用いたファクターとその実験式が χ の影響に関してほぼ妥当であるということができる。次に円滑管の粗さを仮定することにより、ファクター F_1 、 F_2 、 F_3 を用いた本実験の実験式及びChisholmの実験結果式と、LM相関を定量的に比較検討する。LM相関から計算される摩擦損失、及び本実験とChisholmの実験結果に円滑管における見かけ粗さを表す式(18)を代入して計算した摩擦損失の比較を図18に示す。液レイノルズ数によって多少の誤差はあるが、LM相関から計算される摩擦損失、及び本実験とChisholmの実験結果から計算される円滑管の摩擦損失はほぼ一致することがわかる。

4. 結 語

粗面壁管液单相流及び気液二相流の摩擦損失を整理するために、エメリクロス管を管内に張り付けた粗面壁管を用いて、水单相流及び空気-水系の気液二相流の摩擦圧力損失を求める実験を行った。実験結果及びその考察は、以下のようにまとめられる。

- (1) プラントル・ニクラゼの実験で用いられた砂を塗布した摩擦管に対して本実験で用いたエメリクロス管の方が、粗粒子密度が大きいため、同じ突起高さでもプラントル・ニクラゼの摩擦損失係数と比較すると、本実験結果の方が大きい。
- (2) 管壁粗さと液流量をパラメーターとした粗面壁管液单相流の摩擦損失の実験式を作成した。実験式は、ファクター $F_0 = Re_t \cdot K^{1/4}$ で整理され、代表的な粗面壁管液单相流摩擦損失の実

験式であるプラントル・ニコラゼ及びミーゼスの式も同様の方法で整理することができる。

- (3) 現在まで整理されていなかった粗面壁管二相流摩擦損失の実験式を、クオリティ χ を3つの範囲にわけて作成した。粗面壁管二相流摩擦損失 ΔP_t は、ファクター $F = Re_t \cdot K^m \chi^n$ を用いることにより良く整理できた。またその粗度 K の指数 m は $1/4$ に、クオリティ χ の指数 n は $\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$, $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 及び $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の範囲でそれぞれ $1/3$, $1/9$ 及び $1/46$ になった。それぞれの実験式は、式(22)~(24)に表される。
- (4) 水平粗面壁管を用いたChisholmの実験結果も同様に、 $\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2}$, $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 及び $10^{-5} \sim 10^{-4}$ のクオリティの範囲でそれぞれ $F_2 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/3}$, $F_1 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$, $F_3 = Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/46}$ で良く整理できることがわかった。
- (5) 一般的な円滑管二相流摩擦損失式であるとLM相関と比較検討し、空気流量(クオリティ)が管摩擦損失に及ぼす影響は円滑管においても粗面壁管においてもほぼ同じであること、また摩擦損失に用いたファクター F_1 , F_2 , F_3 とこのファクターを使用した実験式が χ の影響に関して妥当であることを確認した。

記号 D_e : 管の有効直径 (mm)

e : 粗面突起高さ (mm)

f_t : 摩擦損失係数 f_t

F_o : 摩擦損失整理ファクター, $Re_t \cdot K^{1/4}$

F_1 : , $Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/9}$

F_2 : , $Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/3}$

F_3 : , $Re_t \cdot K^{1/4} \chi^{1/46}$

F' : , $Re_t \cdot K^{1/4}$

F'' : , $Re_t \cdot \chi^{1/9}$

F''' : , $K^{1/4} \chi^{1/9}$

g : 重力加速度 (m/s^2)

K : 相対粗度 $= e/D_e$ (—)

K_s : 円滑管の相対粗度 (—)

Re_t : 液レイノルズ数 (—)

Pa : 大気圧力

ΔP_t : 液单相流圧力損失 (Pa/m)

ΔP_{t*} : 無次元液单相流圧力損失, $\Delta P_t / (Pa \cdot D_e)$

ΔP_t : 二相流摩擦損失 (Pa/m)

ΔP_{t*} : 無次元二相流摩擦損失, $\Delta P_t / (Pa \cdot D_e)$

ΔP_T : 全圧力損失 (Pa/m)

Q_g : 気相流量 (l/min)

u_{to} : 液流速 (m/s)

X : LMパラメーター

α_m : ボイド率 (—)

μ_g, μ_l : 粘度 (Ns/m^2)

ν : 動粘性係数 (m^2/s)

ρ_g, ρ_l : 気液密度 (kg/m^3)

χ : クオリティ (—)

文 献

- 1) Lockhart, R.W.・Martinelli, R.C., Chem. Eng. Prog., 45-1 (1949), 39
- 2) Chisholm, D., et al., Trans. ASME-C, 86 (1958), 276
- 3) 藤原, 機械学会論文集, 24-148 (1958), 1050
- 4) Davis, J.T., Turbulence Phenomena, Academic Press, New York, 1972
- 5) Takamasa, T., J. Nucl. Sci. Tech., 23-8 (1986).
- 6) 世古口, 機械学会論文集, 814-6 (1981), 59
- 7) 植田, 気液二相流, 養賢堂, 1981
- 8) 古屋, 他 2 人, 機械学会論文集, 33-255 (1967), 1761
- 9) Fujita, M・Madarambe, H., Bull. JSME, 22-226 (1984), 700