気水の並行混合流れをもつ降水管内の摩擦圧力損失*

勝 原 哲 治**

Pressure Drop due to Friction for Parallel Flow of Mixtures of Vapour and Water in a Downcomer

by Tetsuji KATSUHARA

In this paper, the author experimentally investigated the pressure drop due to friction for the flow of water containing bubbles in a non-heated downcomer.

First, the pressure drop due to friction and dryness fraction for the parallel downward flow of the mixtures of air and water were measured in a perpendicular 1500 mm long and 19 mm inside diameter glass pipe. Next, the ratios of the coefficient of friction in high pressure regions were extensively computed from the results of the above experiment. Finally, in case we used non-heated downcomer, it was proposed that we might adopt 0.03 as an approximate value of the coefficient of friction.

1. 緒 言

蒸気ボイラの水循環の計算を行う場合には循環回路の圧力損失の算定が必要となってくるが、これにも複雑な計算で甘んじなければならない点が多い現状である。特に降水管内に気ほうを含む場合に気ほうが圧力損失に及ぼす影響については、筆者の知る範囲では明確にされていないようである。気水混合物の流動に関する実験的研究のうち大部分は上昇管または水平管でなされているので、いっそうこの感が深い。すでに下降蒸発管内の気水混合物の流動様式には幾つかの異なるものが存在することが報告⁽¹⁾⁽²⁾されているが、不加熱降水管では吸込うずやその他の原因のために気ほうが混入したとしても、その量はきわめて少いのが普通であって、この場合には蒸気ほうは水とともに下降する。すなわち気水の並行下降流れとなる。しかも降水管の保温を十分に行っているときには、気体の量も、ほとんど変化しない。このため気水混合物の下降流れとしては最も単純なものになる。本文は、このような流れに対する摩擦圧力損失を実験的に求めたものである。もともと、降水管内に気ほうを持ちたくないという最も大きな理由の一つは、摩擦圧力損失が大きくなるからであって、これを明らかにすることは、循環の定常的諸状態を知るに必要なものでなく、循環の安定性を考察する上からも重要なことと思われる。供試された管は内径 19 mm のガラス管であるが、実験の結果では水平管や垂直上昇管に比べ、

かなり異なることがわかったので、これより高圧域に拡張した場合の摩擦係数比を計算した。この拡張が適切であるか否かについては、降水管の場合には実験的根拠は薄弱であるが、Nelson および Martinelli⁽³⁾が蒸発管に対して試みて、好成績をあげたところをみれば、この場合のように、それに比べ更に単純なときには、十分信頼できるものと思われる。

2. 実験装置および測定

第1図に装置の概略図を示す。高さ 4 m のヘッドタンク T_1 に水道水を通し、あふれ法によりヘッドを一定に保ち、弁 V_2 で流量を調節する。 V_2 とコック C_1 の間は 3/4" ゴムホースでつながれている。したがって、 T_1 より出た水は V_2 と C_1 を経たうえて垂直ガラス管 GP に入る。 C_1 と GP の間には流れの状態を調整するに便利のように、ガラス管がゴムホースに、はさんで入れられているが、その一端には整流のため黄銅のフィルタを入れておいた。空気は圧縮機により圧縮され空気レシーバ AR にたくわえられる。この出口にはニードル弁を設け、その開度により圧力の調整が行われ、それより 3/8" ゴムホースで湿式ガスメータ AG に入る。ここで流量測定を行い、さらにコック C_1 部に導かれ、ここで注射針、ビニール細管を経て、水中に吹き込まれる。気体流量は小さいので噴孔としては簡単な単孔を用いた。第2図にこれを示す。 C_1 から先は気水混合物が下降するが、 C_1 と GP との間の距離は次の二つを考慮して定めた。その一つは気ほうの加速度が無視できる程度に保つこと、他の一つは GP 内の流れの様相を安定せしめるに必要な距離に保つことである。この距離はあらかじめ試験をして決

* 昭和 30 年 7 月 15 日 九州支部講演会において講演、
原稿受付 昭和 31 年 12 月 3 日。

** 正員、九州工業大学。

C_1 : 上方コック, C_2 : 下方コック, C_3 : 水道コック, K : 空気圧縮機, M_1, M_4 : 水銀マンメータ, M_2, M_3 : 四塩化炭素マンメータ, T_1 : ヘッドタンク, T_2 : 排水タンク, T_3 : 流出タンク, V_1 : あふれ弁, V_2 : 水量調節弁, AG : 空気流量計, AR : 空気レシバ, GP : ガラス管

第 1 図 実験装置

め、一般に管径の 50 倍くらいの距離がとられた。ガラス管 GP は長さ 1500 mm, 内径 19 mm, 外径 24 mm のもので、垂直にして上部より 250 mm のところに第 1 測定孔、これから 500 mm 下方に第 2 測定孔、さらに 500 mm 下方に第 3 測定孔を設けた。いずれも静圧測定用に作られたものである。このガラス管内を上から下へ通りぬけた気水混合物はコック C_2 を経てタンク T_3 に行き気水を分離し、水のみはタンク T_2 に入る。この途中で水の流量測定をする。

マンメータは M_1, M_2, M_3 および M_4 を使い、そのうち M_1 は水銀マンメータで、ガスメータ AG の出口の空気圧と大気圧の差を測る。 M_2 および M_3 は四塩化炭素マンメータで、第 1, 第 2 測定孔間、および第 2, 第 3 測定孔間の気水混合物の圧力差を測る。 M_4

は水銀マンメータで第 2 測定孔部の気水混合物の圧力と大気圧の差を測る。

第 1, 第 2 測定孔間の圧力損失 ΔP_{TP1} kg/m², 第 2, 第 3 測定孔間の圧力損失 ΔP_{TP2} kg/m² は次のごとくなる。

$$\Delta P_{TP1} = (\gamma - \gamma_w)H_0 + (\gamma_{CCl_4} - \gamma_w)H_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta P_{TP2} = (\gamma - \gamma_w)H_0 + (\gamma_{CCl_4} - \gamma_w)H_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\gamma, \gamma_w, \gamma_{CCl_4}$ は気水混合物、水、四塩化炭素の比重 kg/m³ をそれぞれ示す。第 1, 第 2 測定孔間の高さと、第 2, 第 3 測定孔間の高さは等しいので、これを H_0 m とする。 H_1 および H_2 は、それぞれマンメータ M_2 および M_3 の四塩化炭素の液頭差 m である。四塩化炭素は、しばしば新しいものと取換えたため、そのたびごとに比重を測定した。

気水混合物の比重は、気体の体積率を φ , 比重を γ_a kg/m³ とすれば

$$\gamma = \varphi\gamma_a + (1 - \varphi)\gamma_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

となるが、この実験では、 γ_a は γ_w に比べ著しく小さいので

$$\gamma \approx (1 - \varphi)\gamma_w \quad \dots\dots\dots (3a)$$

したがって、 γ の値を知るためには φ の値を測定すればよいが、これにはガラス管 GP の上部のゴム管をとり、同時に下部コック C_2 の急閉による方法をとった。

空気流量測定用に使用した湿式ガスメータは 1 回転 5 l のものであるが、この読みはメータ部を通過する空気の体積流量を示すものであるから、重量に換算するためには圧力と温度が別にある。そのうち圧力はマンメータ M_1 の指度を取り、温度はメータ内の温度を水銀温度計で測った。またガラス管内の空気および水の物性値を求めたり、空気の流速を求めるに必要な圧力、温度としては、圧力はマンメータ M_4 の指度によるものを使用し、温度としては水の温度の測定値を用いた。

なお気水二相流の実験に入る前に、予備実験として水の単相流実験を行い、供試ガラス管の摩擦係数を測定しておいた。

3. 実験結果とその考察

(1) 予備実験結果 水の単相流摩擦係数は水力学の書物にもあるが、供試ガラス管に対し直接実験により求めた。 λ_w を水の単相流摩擦係数、 R_{ew} を単相流に換算したレイノルズ数とすれば、 $\lambda_w = 0.3179 R_{ew}^{-0.25}$ となった。ただし実験の範囲は $75000 \geq R_{ew} \geq 2500$ である。

(2) $\sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_w} - \sqrt{\Delta P_w/\Delta P_d}$ $\Delta P_{TP1}, \Delta P_{TP2}$ は (1), (2) 式で与えられるが、この二つの値がほぼ等しいときには、 ΔP_{TP2} をとって管長 H_0 間の気水二相流の圧力損失として代表させ、もし ΔP_{TP1} と ΔP_{TP2} が著しく値を異にする場合には助走距離を延長し、ほぼ接近した値になるまで実験を繰返して最後の ΔP_{TP2} をとって ΔP_{TP} の値に採用した。同じ管

① 空気吹込用ビニール管,
② ゴム管
第 2 図 空気吹込部

内を気水混合物のうちの水のみが単独で流れた場合の圧力損失が ΔP_w で、気体のみが単独で流れた場合のそれが ΔP_d である。これは管内径 d 、管長 H_0 のときには次の式から計算される。

$$\Delta P_w = \lambda_w \frac{H_0}{d} \cdot \frac{w_{w0}^2}{2g} \gamma_w \quad \text{kg/m}^2$$

$$\Delta P_d = \lambda_d \frac{H_0}{d} \cdot \frac{w_{d0}^2}{2g} \gamma_d \quad \text{kg/m}^2$$

ここに λ_d は気体の単相流における摩擦係数である。 w_{w0} 、 w_{d0} は水、気体の単相流における流速で次の値のものにとられる。

$$w_{w0} = \frac{G_w}{F} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad \text{m/s}$$

$$w_{d0} = \frac{G_d}{F} \cdot \frac{1}{\gamma_d} \quad \text{m/s}$$

ここに G_w 、 G_d は水、気体の流量 kg/s、 F は管の断面積 m^2 である。

実際に降水管内の水の流動は、一般に乱流であることを考え、この実験でも水は乱流域のみを取り扱い $75300 \geq Re_w \geq 2880$ の範囲で行われたので、 ΔP_w の計算には摩擦係数 λ_w として、予備実験の結果を採用した。また本実験の対象とする流れでは気体の流量は少いため、気体が単独で管を満たして流れる場合には層流となるのが普通であるので、層流の範囲内だけで実験し、摩擦係数 λ_d には $\lambda_d = 64/Re_d$ を用いた。ここに Re_d はこの場合のレイノルズ数である。これらを用いて $\sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_w}$ の値と $\sqrt{\Delta P_w/\Delta P_d}$ の値の関係を求めると第3図のようになる。

第 3 図

気水二相流の圧力損失を同流量の気体、水の別々の単相流を仮想して整理したのは Lockhart⁽⁴⁾ らが試みたのがそのはじめであるが、このような整理法をとるにあたっては、気体と水の圧力は管の各断面上では互に等しく、二相流の圧力損失は気体と水が実際の管より小さい断面をもつ仮想的な管内を別々に単相で流れているときの圧力損失に等しいものと考えたことから出発している。そして水平管内の気液二相流の摩擦損失の実験結果の整理にはきわめて有効であることが知られている。第3図中の曲線は Lockhart らが水平管に対し物性値の異なる油、水を液体に用い、空気との混合物を作り、種々の管径に対し実験した結果の平均値を描いたものである。この図から気水並行下降流

でも、Lockhart の整理法が適用できることが知られる。しかしながら、この場合の圧力損失は水平管のそれに比べ、はるかに大きくなるので、水平管に対する曲線は使用できないのは当然である。図中の実験点は噴孔径の異なるものも含まれるが、下降流れでは気ほうの大きさが圧力損失に及ぼす影響が大きいことを予想して変えたのであるが、実験の結果では大きい差異は認められなかった。すなわち気ほうの直径が変わっても気体体積率が変らなければ圧力損失には大きな変化はないようである。ただし上の気ほう直径は写真上から求めたもので、はっきりしたものでもないし、あまり微小なものや 4mm 以上の直径のものには実験していないので、最終的な結論は得られなかった。また、気ほうの浮力の働く方向は流れと逆の方向であるので圧力測定値は散ってくる。気ほう直径が大きいほどその傾向が強いことはやむを得ない。

(3) $\varphi = \sqrt{\Delta P_w / \Delta P_d}$ 第4図は気体体積率 φ と $\sqrt{\Delta P_w / \Delta P_d}$ の関係を示す。log φ と log $\sqrt{\Delta P_w / \Delta P_d}$ が直線関係になっているが、この関係が同一直線上に乗るときは流動様式は同一であって、

第 4 図

流動様式が違ってくると別の直線に移動することは垂直上昇管および降水管内の気水混合物の流れに対して一般に共通する性質である。いま $m = \sqrt{\Delta P_w / \Delta P_d}$ とおけば、 $\varphi = C m^x$ なる関係があることになる。ただし C および x は流動様式によって異なる定数である。このことは筆者が実験的に知り得たことであるが、本文の論旨外であるので深く立ち入らないことにする。この実験では気体の流量は少いので、流動様式は、すべて気水並行の混合流であって、上の C および x の値を求め

$$\varphi = 8.466 m^{-1.5446} \dots \dots \dots (4)$$

を得た。

(4) 摩擦係数比 本文で取り扱う気水二相流の

摩擦係数 λ は次の式で定義されるものを用いる。

$$\Delta P_{TP} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \gamma \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに l は管の長さ m , d は管の内径 m , w は連続の原理をもとにした平均流速 m/s , γ はすでに説明したごとく (3), (3a) 式で示された平均比重量 kg/m^3 である。また ΔP_{TP} は前節までは管長 H_0 における摩擦損失としたが、上式では一般的に l の長さにおける摩擦損失 kg/m^2 とする。

すでに $\sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_w}$ と $\sqrt{\Delta P_w/\Delta P_d}$ は第 3 図に示す関係をもつことが判明したので、表現上次のごとく表わす。

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_w}} = f_1 \left(\sqrt{\frac{\Delta P_w}{\Delta P_d}} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

気体、水の流量を G_d, G_w とすれば

$$\sqrt{\frac{\Delta P_w}{\Delta P_d}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_w} \left(\frac{G_d + G_w}{G_w} \right)^2 \frac{\gamma_w}{\gamma}}$$

さきに記号した $m = \sqrt{\Delta P_w/\Delta P_d}$ を用いれば、上式と (6) 式より

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = \frac{1}{\left(1 + \frac{G_d}{G_w}\right)^2} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_w} [f_1(m)]^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで取り扱っている流れでは G_d/G_w は 1 に比べ著しく小さい値となるので

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} \doteq \frac{\gamma}{\gamma_w} [f_1(m)]^2 \quad \dots\dots\dots (7a)$$

一方、気体体積率 φ も (4) 式で与えられるが一般に $\varphi = f_2(m)$ $\dots\dots\dots (8)$

とおく。この実験に対しては (3a) 式の近似が行われるので

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = [1 - f_2(m)] [f_1(m)]^2 \quad \dots\dots\dots (7b)$$

かくて摩擦係数比 λ/λ_w は m によって表わされる。 $f_1(m)$ と $f_2(m)$ の実験値は $f_2(m)$ の方が m に対し整然となっていて測定誤差も少ないので、これに対しては (4) 式を使用し、 $f_1(m)$ は第 3 図の実験値を用いて (7b) 式に入れ λ/λ_w と m の関係を求めると第 5 図のようになる。(4), (7b) の 2 式より明らかなように m を媒介として λ/λ_w と φ も関係づけられる。第 5 図中の平均曲線を用いて、この関係を求めたものを第 6 図に示す。

第 5 図

第 6 図

すなわち、この実験では摩擦係数比は 1.5~5.5 にわたった。これよりみるに下降流れでは、わずかの気ほうの含有でも摩擦損失は想像以上に大きくなることが知られる。降水管に気ほうが入り込むことはたとえ微量でも降水管特性に大きな影響をもち、循環を妨げ、不安定循環を来たすものになることは注目しなければならない。

また過去においても化学工業の諸装置で気体と液体の混合物を下方に輸送する場合に必要な管径の見積りは小さめになって苦労したことが多いと聞くが、この実験の結果より見れば当然であると思われる。

4. 高圧域への拡張

この実験は大気圧のもとで行われたものであるからこれを直ちに高圧ボイラの降水管に適用することはできない。そこで実験結果を高圧域へ拡張することが必要となってくる。拡張に当たっても、残念ながら高圧力と低圧力の間には理論的にも実験的にも相似則が発見し難いので次の方法を用いた。すなわち $f_1(m)$ および $f_2(m)$ は圧力や温度の影響をうけないで、気体および水の粘性係数や密度などの物理定数の値のみが圧力、温度により変化するとした。また、先に (7) 式から (7a) 式に近似したのは G_d/G_w は 1 に比べ著しく小さい値となるためであるが、高圧下では多少の差こそあれ、やはり同じことが言えるのであって、結局、高圧域においても (7a) 式を用いて摩擦係数比を求めうる。ただ γ は (3) 式で与えられるものを用いなければならないから、(3) 式を (7a) 式に代入し、 φ を $f_2(m)$ で表わすと

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = \left[1 - \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \right) f_2(m) \right] [f_1(m)]^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

はじめに述べたように、このような拡張方法が妥当であるか否かについては、降水管に関する限り実験的な裏付けは薄弱であるが、蒸発管では信頼される結果が得られているところをみれば、この場合にも信頼できる結果をうるものと思われる。

m は

$$m = \sqrt{\frac{\Delta P_w}{\Delta P_d}} = \frac{w_{w_0}}{w_{d_0}} \sqrt{\frac{\lambda_w \gamma_w}{\lambda_d \gamma_d}}$$

であるから λ_w には予備実験より得た結果を用い、 λ_d には層流に対する式 $\lambda_d = 64/R_{ed}$ を用いると

各圧力とも曲線は上から $Re_w = 5000, 10000, 20000, 50000, 100000$

第7図 高圧域における摩擦係数比

$$m = 0.07038 \sqrt{\frac{w_{w0}}{w_{d0}} \cdot \frac{\nu_w}{\nu_d} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d}} Re_w^{0.75} \dots \dots (10)$$

をうる。ここに ν_w, ν_d は水、気体の運動粘性係数 m^2/s である。蒸気ボイラでは水は飽和水、気体は飽和蒸気となるので、 ν_w および γ_w には飽和水に対する値を、 ν_d および γ_d には飽和蒸気に対する値を用いれば、 w_{d0}/w_{w0} と Re_w が与えられれば m は (10) 式より求まり、これを (9) 式に入れて λ/λ_w を求めることができる。このとき $f_1(m), f_2(m)$ には、すでに求められたものを用いる。このようにして圧力 1, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 kg/cm^2 について Re_w をパラメータとして λ/λ_w と w_{d0}/w_{w0} の関係を描けば第7図のごとなる。

5. 結 言

常圧下で空気と水を用いて、垂直降水管内の気水並行混合流を発生せしめ摩擦圧力損失を求め、さらに高圧域への拡張の計算を行い次の結果を得た。

(1) 並行混合流では Lockhart らが水平管に適用した流れの模型化による整理法が、垂直降水管にも適用できる。

(2) 気水混合物全体の流量、気水の流量比が同じでも水平管よりも降水管の方が、より大きな圧力損失を生ずる。

(3) 摩擦係数比は m の値によって変るが実験範囲では $1.5 \sim 5.5$ であった。

(4) 高圧域では摩擦係数比は第7図に示すようになった。

(5) 全体を通じて知られることは、降水管内には気ほうのわずかな量を含んでも摩擦損失は著しく大きくなることで、これは水平管や上昇管とは違っていることである。

(6) 不加熱降水管で優秀な気水分離器を

もったとしても管内に気ほうを全く含まないようにすることはむずかしい。このような場合には λ/λ_w は 1.5 くらいにとるべきである。たとえば大ざっぱな値としては摩擦係数 λ は 0.03 として計算するがよい。

最後に本研究に御指導御鞭達を賜った九大山西教授、種々御教示を賜った九大西川助教授に厚く御礼申し上げる。

なお本研究は文部省科学研究費によるものである。

文 献

- (1) 山泉, 機械学会九州支部第7期総会講演会前刷, 131 ページ (昭 29).
- (2) 山泉・川江, 機械学会札幌臨時大会講演会前刷, 第2部, 17 ページ (昭 30).
- (3) D.B. Nelson and R.C. Martinelli, *ASME, Trans.*, Vol. 70, p. 695 (1948-8).
- (4) R.W. Lockhart and R.C. Martinelli, *Chem. Engng. Progg.*, Vol. 45, No. 1, p. 39 (1949-1).