

管路内気液二相流の水頭損失について (第5報)

— 垂直ら旋管路の場合 —

福田 浩・樋渡 久孝

On the Head Loss of Two Phase Flow through a Pipe (5th Report)

— Case by the Vertical Spiral Pipe-line —

Hiroshi FUKUDA and Hisataka HIWATARI

(1993年10月29日受理)

Prediction of pressure drop in two phase gas-liquid flow is of great importance in many applications such as oil and gas pipelines, certain type of nuclear reactors, heat transmitters and many chemical process.

The aim of this paper is frictional coefficients determined from an experimental study of the flow of two phase air and water mixtures in a vertical spiral pipe-line.

Influence factors of this flow is velocity, air to water mixture ratio, up or down streams, structure and size of vertical pipe-line, etc..

Head loss of this pipe-line are by means of probes set in the flow.

1. 緒 言

気体と液体の混流する気液二相流のら旋状管路は小型の強制貫流ボイラ、化学プラント、熱交換装置および原子炉の冷却系などに広く用いられており、工業上重要であるにもかかわらず、その流動状態や流動摩擦損失はコイルの巻き方によって複雑に変化するため、その性質についてはよく知られていないようである。

ら旋管の研究報告はこれまでもなされているが、その多くは平面的な曲り管か、空間的としても三次元性の少ない実質的には平面曲り管と考えられるものが主である。

このような見地から、本報告では垂直柱体にら旋状に巻きつけた三次元性の強い管路について、空気と清水の混合二相流を上向きと下向きの二方向に流動させて、その流速、気液の混合割合や巻きつけコイルの直径、ら旋ピッチなどを種々に変化させた場合について実験を行い、流動状態と管摩擦損失を明確にすることを目的とし、得られた結果を実用性の高いDarcy-Weisbachの式の形で表わすことを試みたものである。

2. 実験の装置と方法

図-1に実験装置の概略を示した。

供試ら旋管は市販の透明ビニール製でその内径 d は21.2mmである。

図において地下貯水槽よりポンプアップされた水は、バルブおよびポンプ回転数によってその量 Q_w を調節した。

混入空気は空気圧縮機により蓄圧し、与えられた気液比 r に合わせてその量 Q_a をフローメータを介してら旋管路の上流部から供給した。

垂直ら旋管路部の圧力損失水頭は、長さ $l=10\text{m}$ を測定区間としてU字管水銀マンオメータで計測し、曲り管の内側と外側では圧力値に若干の差異が認められたので、その平均値を圧力損失水頭値 h (mAq) として整理した。

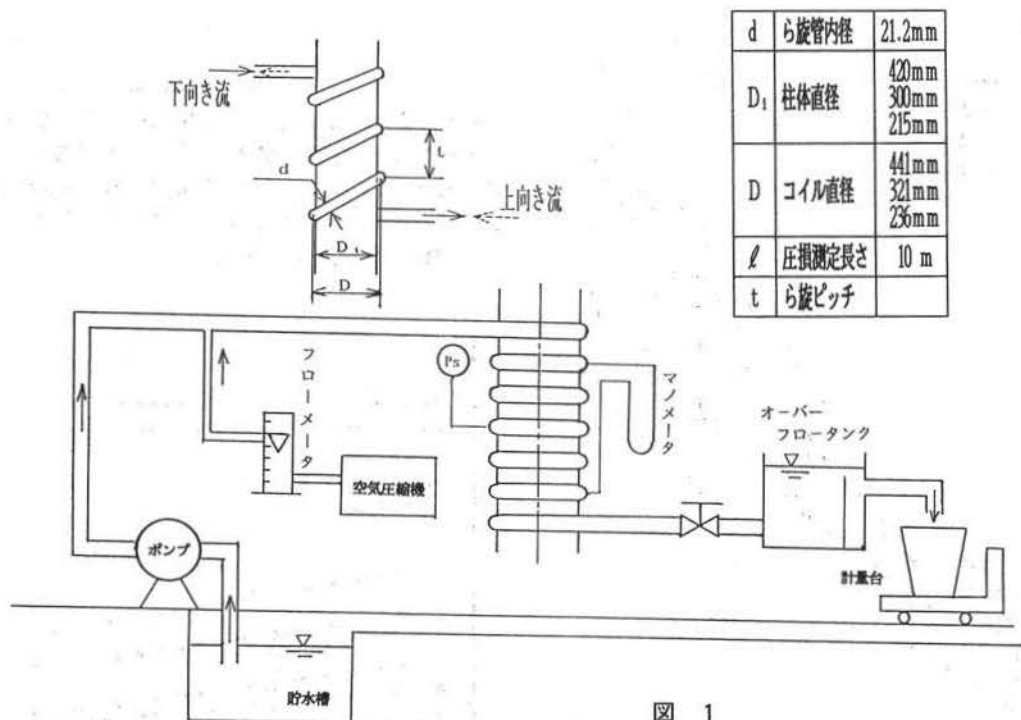
なお、測定部中央における管内圧力 P_s は全実験を通じて 1kg/cm^2 一定とした。

管内流速 v は気泡の合体、塊状流動状態をさけてほぼ均一分散流となることを条件とし、2.0~4.0m/sの間を0.5m/sおきに5段階とした。

気液比 r すなわち空気量 Q_a と水量 Q_w の容積比 Q_a/Q_w は、気液の均等分散を考慮して空気なしの $r=0$ から $r=0.5$ までの間を0.1とびに選んだ。

ら旋状の管路は、垂直に立てた円柱体の外径 D_1 を

管路内気液二相流の水頭損失について



d	ら旋管内径	21.2mm
D ₁	柱体直径	420mm
		300mm
		215mm
D	コイル直径	441mm
		321mm
		236mm
ℓ	圧損測定長さ	10 m
t	ら旋ピッチ	

図 1

215、300、420mmの3通りとし、巻きつけたコイル直径DはD₁+dとし、(D/d)として整理した。

また、管巻きつけピッチtは(t/D)として表わし、それぞれのDに対し3種類とした。

本実験の対象としたコイル直径Dとピッチtの関係は次表の通りである。

D	236 mm			321 mm			441 mm		
D/d	11.2			15.3			21.0		
t/D	0.11	0.28	0.56	0.08	0.30	0.58	0.06	0.32	0.60

3. 実験の結果と考察

3. 1 圧力損失水頭と流速

一連の実験結果の中から、種々の気液比rに対する圧力損失水頭hを流速vの関係としてコイルの直径D=321mm (D/d=15.3), ら旋のピッチt/D=0.30の場合について流れ方向の違いを含めて示すと図-2のようになった。

ここに示された結果から、hはvの増加にともない増大し、一定のvのもとではrの増加につれて一様に減少しており、下向き流の値が上向き流に比べ若干ながら高い値を示すことが明らかとなった。

つぎに、コイル直径D/dに対するhをrをパラメータとして示したものが図-3で、hはD/dの増加にともない一様に減少することがわかった。

なお、ら旋ピッチt/Dに対するhをrをパラメータとして示すと図-4のようになり、hはピッチの増加につれてほぼ直線的に増大する傾向となることが明らかとなった。

同一構造上における流れ方向による損失水頭hの差異は、上向き流では気泡の浮力による作動方向が水流方向と一致して流動状態がスムーズであるのに対し、下向き流では気泡の浮上作用方向と水流方向とが逆向きとなって流動状態が複雑となることから圧損は上向き流に比べて下向き流の場合が大きい値を示すものと考えられる。

また、コイル直径値が増大するにしたがってhが減少するのは、巻きつけの曲率が大きくなるにつれて直管路系に近づき、同一管路断面における慣性による内外速度差に起因する管内流動抵抗の減少によるものと考えられる。

なお、ら旋ピッチが増加することによるhの増大は、一定測定区間内における垂直距離の増加にともなう上下方向成分流の割合が増加し、三次元的な流動要素が多くなって平面二次元的な流れに比べて複雑な流動状態をもたらす結果と考えられる。

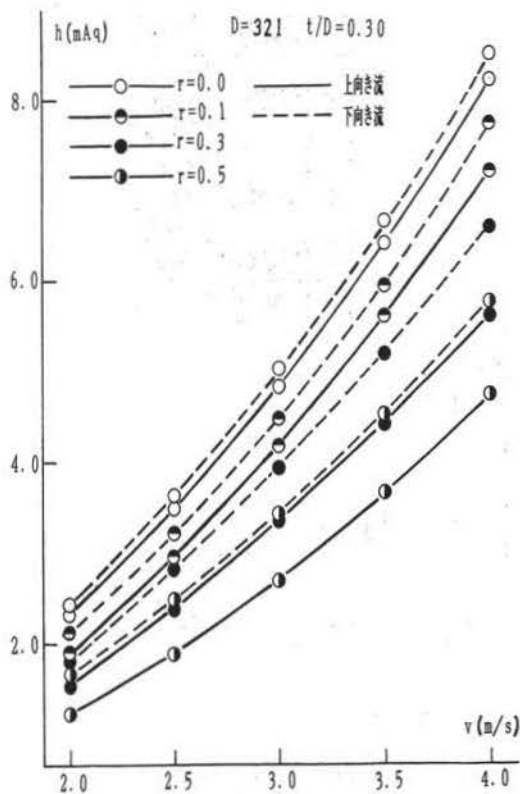


図 2

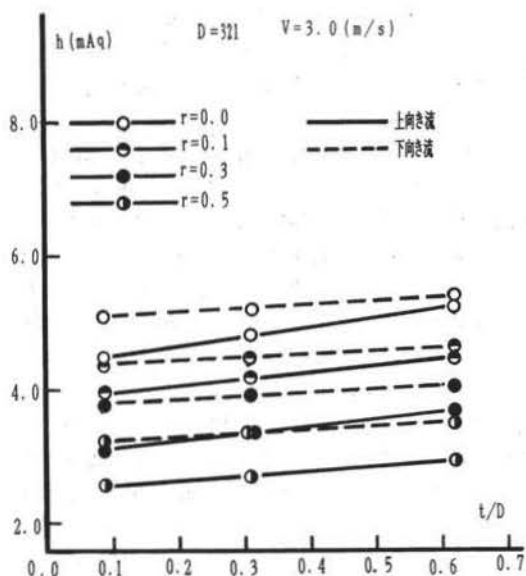


図 3

一連の実験によって得られた圧力損失水頭値 h を水単相の場合についてよく知られている

$$h = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^n}{2g} \quad (1)$$

(Darcy-Weisbachの式)

の形で表わすこととし、式中の流速 v の指数値 n を求めるため h と v の関係を両対数表示すると、一定の気液比 r に対し h は v の増加につれて直線的に増大し、それぞれの r について v の増加に対する h の増加割合はほぼ一様となった。

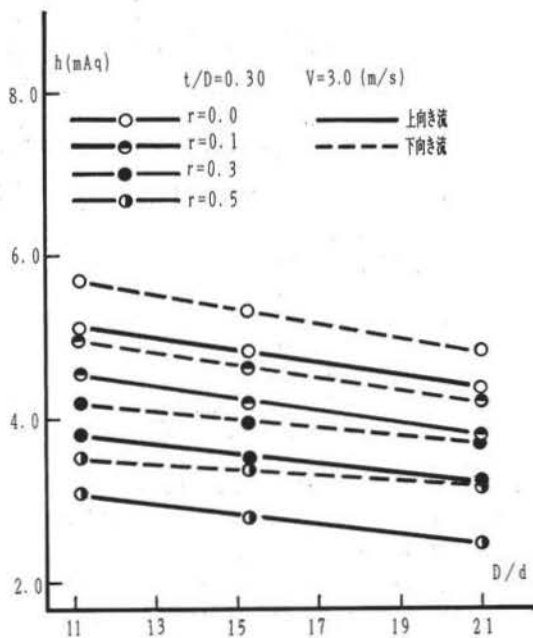


図 4

したがって、一定のコイル直径およびら旋ピッチに対する v の指数値 n は本実験の範囲では流れの方向によって

上向き流の場合

$$n = 1.77$$

下向き流の場合

$$n = 1.85$$

と求めることができた。

3. 2 摩擦損失係数とコイル直径、ら旋ピッチおよび気水比

前記 (1) 式中の摩擦損失係数 λ に本実験での条件を加味することとし、 λ に対する気水比 r をコイル直径 D/d をパラメータとして流れ方向による結果を示したのが図-5である。

ここに示されたことから、 λ は上下方向流ともに D/d の増加につれ、 r の増大にともないほぼ直線

管路内気液二相流の水頭損失について

的に減少し、 λ は r の一次関数として求まることが分かり、その式の形を

$$\lambda(t/D) = A - B \cdot r \quad \text{---(2)}$$

とし、上下流のそれぞれのコイル直径値とら旋ピッチに対し(2)式を算出する関係式を求めるとつぎの表のような結果が得られた。

ここに示された表の結果から(2)式におけるBの値は、各コイル直径に対してピッチに無関係に一

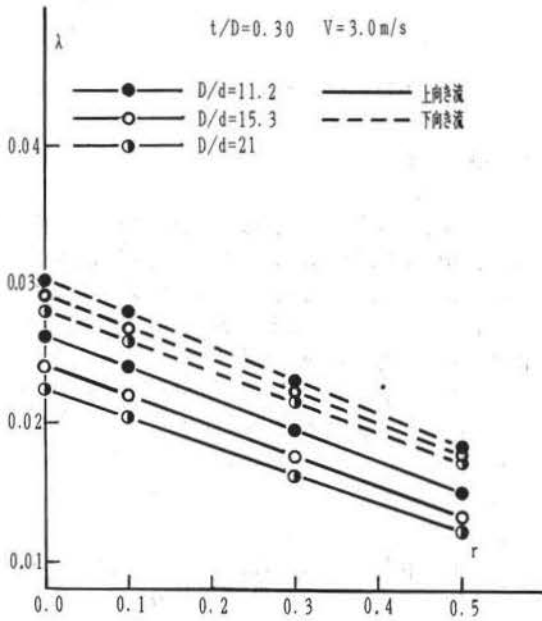


図 5

定であることが知れた。

したがって、B値とコイル直径(D/d)の関係を図示すると図-6に示したように流れの方向に対しそれぞれ直線で表わされ、このことからB値は上向き流では

$$B = 0.024 - 0.0002(D/d) \quad \text{---(3)}$$

下向き流では

$$B = 0.030 - 0.0004(D/d) \quad \text{---(4)}$$

として求められた。

つぎに、(2)式中のAの値に本実験の条件値のコイル直径とら旋ピッチを含ませることとし、 λ と(D/d)の関係を(t/D)をパラメータとして図示すると図-7に示すようになり、 λ を片対数とすることによって直線化し、その傾きは(t/D)に対してほとんど同一値となってA値を求める式を

上向き流	下向き流
$D_i = 215\text{mm}$ $\lambda(0.11) = 0.0270 - 0.022r$ $\lambda(0.28) = 0.0277 - 0.022r$ $\lambda(0.56) = 0.0290 - 0.022r$	$D_i = 215\text{mm}$ $\lambda(0.11) = 0.0314 - 0.025r$ $\lambda(0.28) = 0.0332 - 0.025r$ $\lambda(0.56) = 0.0356 - 0.025r$
$D_i = 300\text{mm}$ $\lambda(0.08) = 0.0251 - 0.021r$ $\lambda(0.30) = 0.0262 - 0.021r$ $\lambda(0.58) = 0.0272 - 0.021r$	$D_i = 300\text{mm}$ $\lambda(0.08) = 0.0290 - 0.023r$ $\lambda(0.30) = 0.0300 - 0.023r$ $\lambda(0.58) = 0.0315 - 0.023r$
$D_i = 420\text{mm}$ $\lambda(0.06) = 0.0233 - 0.020r$ $\lambda(0.32) = 0.0243 - 0.020r$ $\lambda(0.60) = 0.0254 - 0.020r$	$D_i = 420\text{mm}$ $\lambda(0.06) = 0.0270 - 0.021r$ $\lambda(0.32) = 0.0280 - 0.021r$ $\lambda(0.60) = 0.0290 - 0.021r$

$$A = ae^{m(D/d)} + b \quad \text{---(5)}$$

と表わすこととした。

上向き流ではeの指数値mは(D/d)の関数で-0.019となり、係数値aは0.029と得られた。

なお、(5)式中のbの値はら旋ピッチの関数として

$$b = 0.0021 + 0.0042(t/D)^{0.5} \quad \text{---(6)}$$

と求められた。

下向き流に対しても前述同様の実験結果についての考察を行い、(5)式中のeの指数値mと係数値

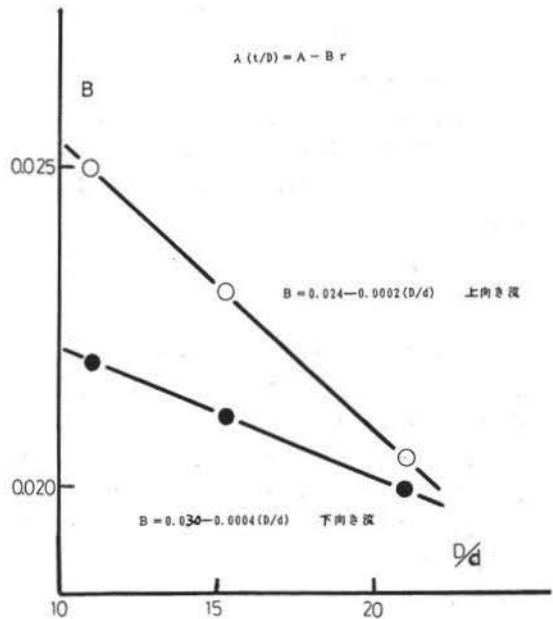


図 6

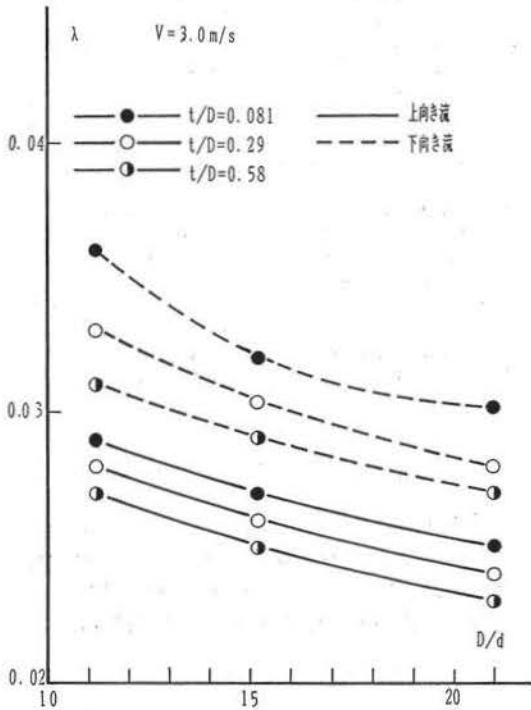


図 7

a の値はそれぞれら旋ピッチの一次関数式として

$$m = -0.022(t/D) - 0.02 \quad (7)$$

$$a = 0.021(t/D) + 0.025 \quad (8)$$

と求められた。

式中の b 値はコイル直径 (D/d) を無限大として一本の直管路となることを想定したとき、ら旋ピッチ (t/D) には無関係となって定数化され、検討の結果

$$b = 0.01 \quad (9)$$

となった。

以上の結果および考察により、上向き流、下向き流のそれぞれに対して整理すると、ら旋管路の圧力損失水頭値 h を算出する実用式 Darcy-Weisbach の形で表わすことができ、本実験の範囲内では摩擦損失係数 λ にコイル直径 (D/d)、ら旋ピッチ (t/D) および気液比 r と流速 v を加味した実験式として次式を得ることができた。

上向き流の場合

$$h = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^{1.85}}{2g} \quad (10)$$

ここで

$$\lambda = 0.0042(t/D)^{0.5} + 0.029e^{-0.019(D/d)} - \{0.024 - 0.0002(D/d)\}r + 0.0021 \quad (11)$$

下向き流の場合

$$h = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^{1.85}}{2g} \quad (12)$$

ここで

$$\lambda = \{0.021(t/D)\}e^{-\{0.022(t/D) + 0.021(D/d)\}} - \{0.030 - 0.0004(D/d)\}r + 0.01 \quad (13)$$

4. 結 言

以上本実験の垂直ら旋管路の場合について、圧力損失水頭値 h を求める実験式として実用性の高いと云われている Darcy-Weisbach の式形態を基本式として用いることとし、式中の摩擦損失係数 λ に本実験での種々の条件を加味した。

このことにより λ 値は可成り複雑なものとなったが、一連の本実験範囲の結果に対しては十分にその目的・価値を満たすものを得ることができた。

得られた結果の中から主なものについて記すと次のようになる。

- 1) 圧力損失水頭は流速に最も大きく影響され、流速の増加につれ増大した。気液比は流速の大きな範囲で影響の度合が大きく、気液比の増加にともなって圧力損失は減少した。
- 2) ら旋ピッチが増大するにつれ同一流速、同一気水比のもとでは圧力損失水頭は増加する傾向が認められた。
- 3) コイル直径の増大にともなってら旋の曲率半径が増し、同一流速、同一気水比のもとでは圧力損失水頭は減少することが認められた。
- 4) 上向き流と下向き流を比較すると、下向き流が流動状態が複雑となことから圧力損失水頭は大きく表れた。

終りに、本実験を行うにあたり、終始、協力の勞を惜しまなかった当時学生の大野康行、平塚和好、岡本勇人、佐々木悟、中村則夫、田村敏、小野寺敦、藤田敏也、神原輝男、夏井学の諸君に感謝の意を表します。

管路内気液二相流の水頭損失について

参考文献

- 1) 日本機械学会編 「気液二相流技術ハンドブック」, コロナ社, (1989)
- 2) 村上, 末広, 大野, 日本機械学会論文集, No. 39, vo. 1324 (1973)
- 3) Streeter, 「Handbook of Fluid Dynamics」, McGRAW-HILL BOOK Co. (1985)
- 4) 赤川浩爾, 「気液二相流」, コロナ社, (1980)
- 5) 植田辰洋, 「気液二相流」, 養賢堂, (1981)