

管水路における空気混入流の縮尺効果

誌名	農業土木試験場技報. HE, 水工
ISSN	02870029
著者	中, 達雄 加藤, 敬 岩崎, 和巳
巻/号	8号
掲載ページ	p. 1-11
発行年月	1988年3月

管水路における空気混入流の縮尺効果

中 達雄*・加藤 敬*・岩崎和巳*

Scale Effects on Air-Entrainment Flow in Pipe Lines

by Tatsuo NAKA, Takashi KATO and Kazumi IWASAKI

目 次

I 緒 言	1	1 空気塊の発生	5
II 水理実験とその方法	1	2 空気塊を発生させない水理量の相似性	6
III 流況の遷移	2	3 空気塊の発生機構	6
1 本実験範囲で発生した流況	2	4 空気塊の形状とその相似性	7
2 流況の縮尺効果	3	5 空気塊によるエネルギー損失水頭	8
IV ブローバック現象	4	VI 結 言	10
V サイホン部での水理挙動	5	参考文献	11

I 緒 言

一般に管水路の空気混入流も含め水理現象の場の中に空気が介在する混相流については、その相似性に関しての明確な法則は未だ明らかにされておらず¹⁾、又縮尺の小さなモデルでは、原型の空気混入現象を再現することは不可能とされている²⁾。

開水路の単相の流れでは、相似則の緩和の方法として慣性力と重力の影響を考慮したフルード相似則が広く利用され、定量的な解析がなされている。

しかし、管水路における空気混入流の挙動については、その相似性が不明なため、模型実験結果から推察される定性的事項を原型に当てはめ、設計・施工に応用しているのが実状である。

一方、近年農業水利事業では、大口径管路の適用により、口径が2,000mm以上の管水路が出現しており、管路は大規模化している。そして、農業用水管路は、その利用形態及び水路形式から空気が混入されやすい特性を有している。これらの空気を含む水理挙動を模型実験から把

握するためには、縮尺効果を明らかにし、何らかの相似則を確立する必要がある。

そこで本報文では、口径100mmと200mmの幾何学的に1:2の縮尺比を有する管水路模型を利用した水理実験からそれぞれの水理特性を比較することにより、管水路における空気混入流の縮尺効果 (Scale effect)、及びこれらの現象の相似性について解析を試みたものである。

水理挙動の要素としては主に、流況の遷移 (Flow pattern)、ブローバック現象 (Blow backs)、サイホン部における空気塊の形成及び空気塊によるエネルギー損失等を中心とした。

II 水理実験とその方法

水理実験装置としては、口径100mmと200mmの透明アクリル円形断面管路模型2基を使用した (Fig. 1)。管路延長は2基とも19.7mであり、上流はスタンド型の水槽を設け、下流には空気排気用の排気工と管内圧力調整用のバルブを取付けてある。最末端には、計量用の四角 (200mm管路) 及び三角堰 (100mm管路) が設置されている。

管路勾配は、 2.22×10^{-3} の順勾配となっている。

管路中央部には空気塊の挙動を調べるために、Fig. 2に示す幾何学的に1:2の縮尺比を持つ互いに相似なサイホン部をそれぞれ設けた。サイホン部は4カ所の屈折部を有し、屈折中心角90°、曲率半径 $R=D$ (D :管径)となっている。

空気混入流の発生は、上流水槽からコンプレッサーを利用して、強制的に気泡状の空気を混入させた。

管内圧は、 0.15kg/cm^2 (ゲージ圧) 以下の低圧管路であり、実験条件上の圧力変動幅は3%以内であったためデータ処理においては、空気量の体積変化は無視した。又、空気混入比は、大気圧下の空気流量と水の流量の体積比で表した。

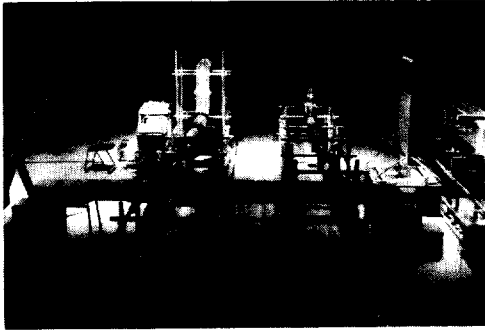


Fig. 1 水理模型装置の全景(上流より下流を望む)

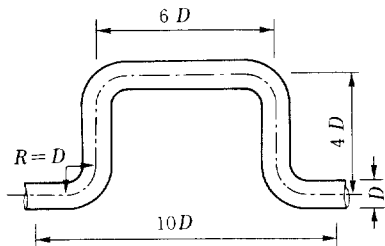


Fig. 2 サイホン部模型諸元 (D :管径)

実験流量は、 $0.00369\sim 0.0614\text{m}^3/\text{sec}$ の範囲である。水理計測は、水流量 (Q_w)、空気流量 (Q_a)、管内水深、管内圧、気温、水温であり、流況及び空気の挙動については目視観測によった。流速については特記していない限り、 $V=Q_w/A$ (V :流速、 Q_w :水流量、 A :管路断面積) の見かけ流速として整理した。

水流量は末端の堰により、又空気量は Fig. 3に示す装

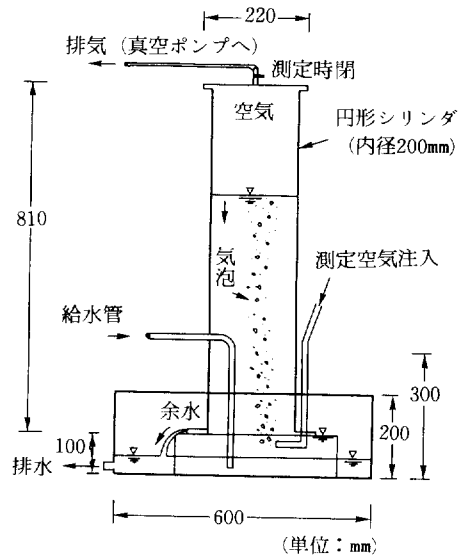


Fig. 3 空気量測定装置の概要

置を用いて水上置換法によりそれぞれ計量した。

管内水深及び管内圧については、マンメータにより計測し、その測定位置は、それぞれ上流水槽から、4.30, 9.30, 11.30, 14.30, 18.30m 離れた下流5地点とした。

III 流況の遷移

1 本実験範囲で発生した流況

流況分類に係わる管路線形条件として、本実験管路は順勾配水平管路と見なすことができる。

流速値は、一般的に管路路の設計に用いられる範囲とした。

流況としては、下記の5形態³⁾が観察された。

- (1) 層状流 (Stratified flow)
- (2) 波状流 (Wavy flow)
- (3) プラグ流 (Plug flow)
- (4) スラッグ流 (Slug flow)
- (5) 気泡流 (Bubble flow)

層状流は、混入された気泡がそれぞれ合体して浮力を増した空気が管頂部に滞留し、気相と液相が平滑な面を成して流下する形態である。すなわち、平衡状態の気相部が管頂部に形成されている。

波状流は、層状流とプラグ流の遷移領域で発生し、層状流に比較して流水の速度が増加し空気への抗力が増すため、空気は流水とともに輸送され始める。このため、場所的に気相部の圧力が変化するために、境界面が波状

的となる。

プラグ流は、浮力により気泡が管頂部に集積、合体して、大気泡を形成して、これが流下する形態での流況であり、管頂部に楕円形の大気泡が現れる。

次のスラグ流は、プラグ流と気泡流との遷移領域で発生し、プラグ流で見られる大気泡の周辺に無数の小気泡が集積している (Fig. 4)。これは、流速の増加により流れの乱れが発達し、互いに気泡が合体して、大気泡を形成する部分と、合体できずに単独の気泡として液相に浮遊する部分とが混在しているために生じるものである。

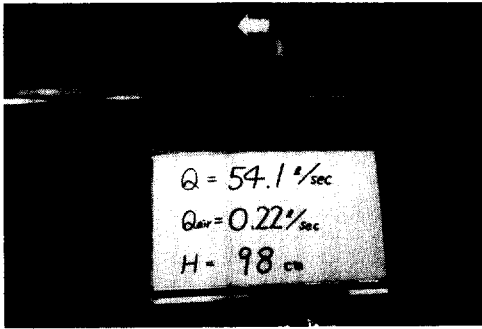


Fig. 4 スラグ流の流況 (管路上面)

なお、小気泡は、浮力の影響により大部分は管頂部に浮上している。

気泡流は、この流れの乱れが十分に発達し、気泡が互いに合体できずに管路内に分散している状態である。気泡が合体できない要因としては、流れの乱れにより、気泡の浮力の影響が弱まり、かつ、気泡間の水の表面張力による合体作用が妨げられるためと考えられる。

以上の各流況は列挙した順に従い、流水の流速の増加及び空気量の相対的減少に対応して変化する。

2 流況の縮尺効果

100mm管と200mm管の流況遷移図を比較することにより、管径の相違による流況の変化を調べることとする。

まず、流速と空気混入比により、流況を分類した遷移図を Fig. 5-(1)~(2)に示す。

流速の増加に対応して、それぞれの管路とも層状流、プラグ流、気泡流と流況が遷移し、又、空気量が増加すると気泡流がプラグ流へ、プラグ流が層状流へと遷移する。層状流からプラグ流への遷移については、空気量の影響よりも流速が要因として卓越している。すなわち、両管径とも空気混入比に係わらず流速が0.60~0.80m/secの範囲が遷移領域となっている。

層状流からプラグ流への遷移は前節で述べたように、流水からの抗力が影響しており、層状流では、空気塊の浮力と抗力が釣合った状態となっており、(1)式による力の条件式が成立しているものと考えられる。

$$U \cdot \omega \cdot \sin \theta = C_0 \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \dots\dots\dots(1)$$

ここで、右辺：流水の空気塊への抗力 (kg)

左辺：管軸方向の浮力 (kg)

U ：空気塊の容積 (m³)

ω ：水の単位重量 (kg/m³)

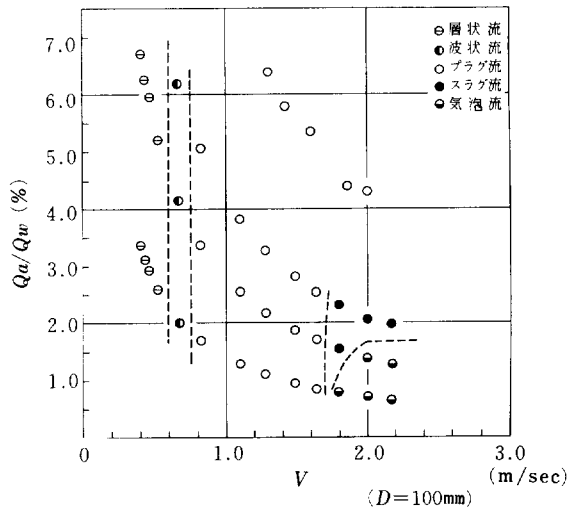


Fig. 5-(1) 流速 V と空気混入比 Q_a/Q_w による流況遷移図

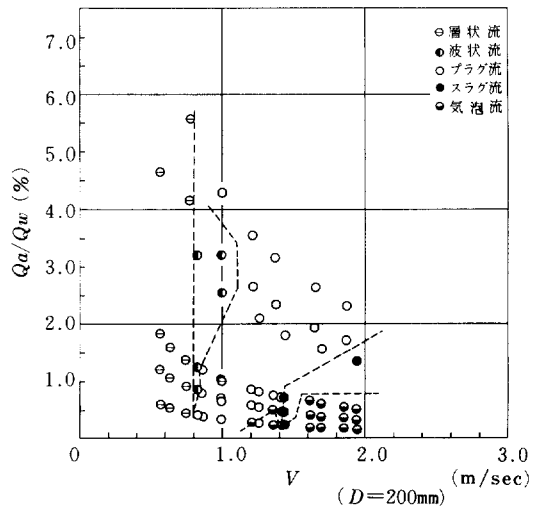


Fig. 5-(2) 流速 V と空気混入比 Q_a/Q_w による流況遷移図

θ : 管勾配, C_0 : 抗力係数
 ρ : 水の密度 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)
 V : 水の流速 (相対速度) (m/sec)
 S : 流水に対して垂直な平面に投影した空気塊の面積 (m^2).

なお、二つの模型では、空気塊の形状による抗力係数が増えることが考えられる。しかし、プラグ流への遷移は、流水の抗力が空気浮力よりも大きくなると成されると仮定すれば、その遷移は流水の流速に依存することとなる。

次に、プラグ流から気泡流への遷移を調べる。100mm管では、流速が1.8~2.0m/sec以上から、気泡流となっているが、200mm管では、1.2~1.4m/sec以上から気泡流が発生している。従って、管の大きい方が、低い流速値の領域で気泡流が発生することがわかる。

気泡の残留は、本来流れの乱れが影響しているものと考えられることから、無次元量として、レイノルズ数 ($Re = V \cdot D / \nu$; V : 流速, D : 管径, ν : 動粘性係数) を考慮して、 Re 数と空気混入比により Fig. 6-(1)~(2)に示す流況遷移図を作成した。

層状流からプラグ流への遷移領域は、100mm管と200mm管では Re 数のオーダーが異なる境界値でそれぞれ存在しており、この遷移領域には、本実験範囲では流れの乱れが影響していないことがわかる。

一方、プラグ流から気泡流に関しては $Re = 2 \times 10^5$ 以上から両管径とも気泡流が発生しており、又、空気量にも影響されている。気泡の径は、水の表面張力により規定され、一般に模型と原型では同一の径を示すものであることから、少なくともプラグ流から気泡流への変化は、一つの Re 数により、その遷移領域が規定されると考えられる。

以上により、層状流からプラグ流への遷移は、水の流速が、又、プラグ流から気泡流へは、レイノルズ数がそれぞれ因子として卓越していることが明らかとなる。

そして本実験では気泡流は、 Re 数が 2×10^5 以上の領域で発生することも判明した。

IV ブローバック現象

本現象は、順勾配管路において空気塊が有する浮力により、流水に逆らって空気が上流へ戻る現象である。

この現象は、オープンタイプ系パイプラインでは、水槽間のサージ現象を増幅させたり、呑口部から管路内への空気混入を防止する機能を有している等空気が関係する管路では、重要な現象である。

Fig. 7に100mm管と200mm管のブローバック発生領域を

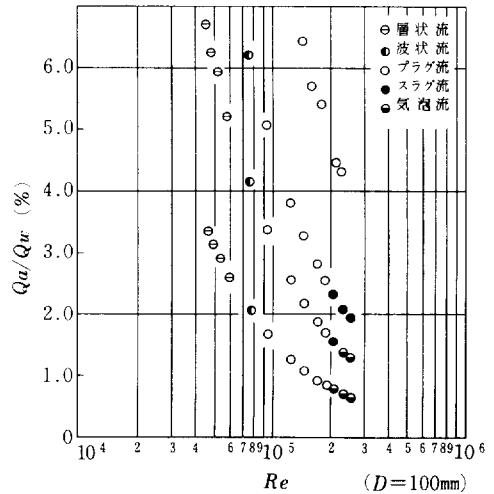


Fig. 6-(1) レイノルズ数 Re と空気混入比による流況遷移図

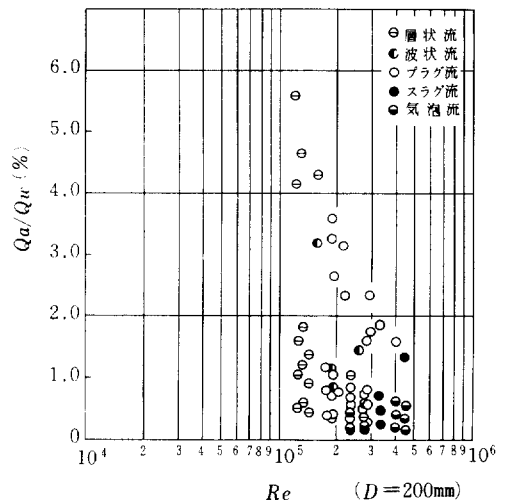


Fig. 6-(2) レイノルズ数 Re と空気混入比による流況遷移図

流速をパラメーターにとって示した。本図の縦軸は、コンプレッサーによって混入させた空気が下流へ輸送される率を示し、そして、輸送率が100%では、ブローバックが発生していないことを示すものである。

ブローバックの発生は、気泡状の空気が浮力により管頂部に集積・合体し、空気塊の容積が増加して、その一部が間断的に逆流する現象である。力学的には、前章で示した(1)式において、管軸方向の空気の浮力が流水からの抗力に打勝つ場合に本現象は発生する。

従って、本現象は管勾配、流速、空気塊の容量及び空

気塊の形状による抗力係数が支配的となる。100mm管と200mm管との比較では、管勾配は等しい条件にあるが、管径が大きい方が同じ空気量であっても大きな流速範囲までブローバックが発生している。

ブローバックを完全に抑える流速は、100mm管が0.42 m/sec, 200mm管が0.60m/secであった。一方、それぞれの管径とも、空気量によるこの流速の差異は認められなかった。従って、管径ごとに抗力係数 (C_0) がそれぞれ異なった値を取ることが考えられる。

次に、ブローバックを抑える流速値の比と縮尺比の関係調べると、縮尺比の0.54乗の流速比を示した。

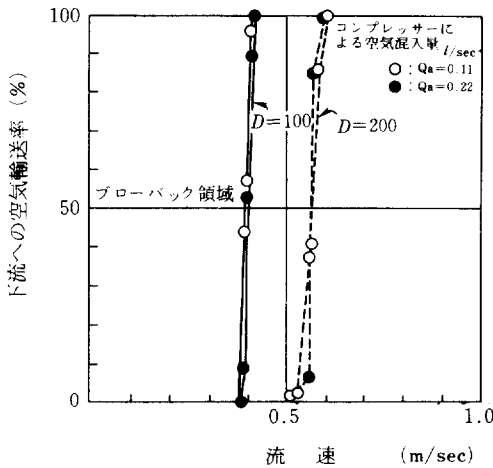


Fig. 7 ブローバック領域 (管勾配 2.22×10^{-3})

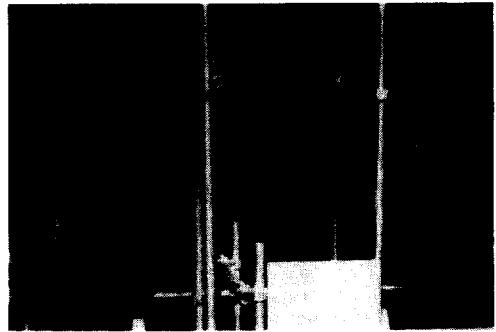
V サイホン部での水理挙動

1 空気塊の発生

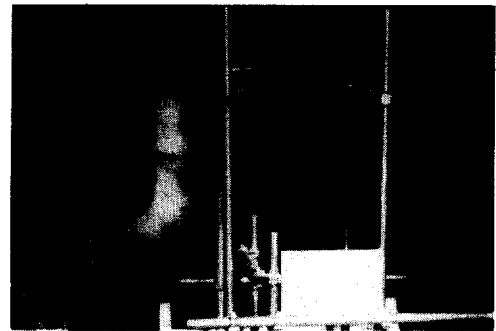
サイホン部での空気混入流による空気塊の発生は、ある流速値以下で起こり、流速の増加に伴い空気が掃き出されて消滅することが知られている⁴⁾⁵⁾。

本実験では、100mm管の場合では、流速が1.321m/sec以下において、又200mm管の場合では、1.445m/sec以下においてそれぞれ空気塊が発生した。空気塊の発生位置は、サイホン頂部の下流側を中心としている。

空気塊の形態としては、次の二つの型が観察された (Fig. 8)。比較的容積の小さい空気塊は、管路屈折部の一部に形成され、下流末端に若干の乱れが生じ、この乱れから気相部より気泡が液相に混入している。容積の大きな空気塊では、開水路で生じる跳水に類似した現象が



小さな空気塊の発生例



大きな空気塊の発生例

Fig. 8 サイホン部における空気塊の発生

下流下り管路に発生しており、空気により縮流された水脈が下流の満流管路へ貫入する形態を呈している。下流への気泡の混入量も多量であり、下流鉛直管路では気泡により流れは白濁している。

これらの二つの形態の空気塊が発生しない流速と空気混入比の関係を示す Fig. 9に示す。

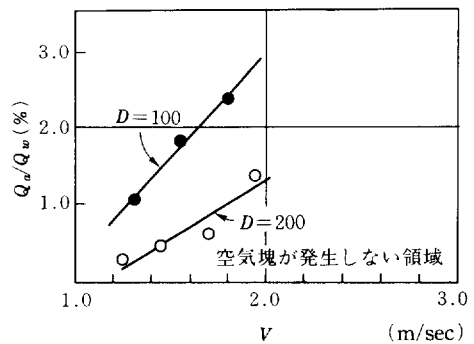


Fig. 9 サイホン部に空気塊が発生しない流速 V と空気混入比 Q_a/Q_w の関係

本図では、プロット線の右下の領域では空気塊が発生しないこととなるが、空気塊を発生させないためには、同じ空気混入比下において、管径が大きい方が管径の小さい管路の時よりも大きな流速が必要である。又、この時のそれぞれの流況は、100mm管がプラグ流、一方200mm管は気泡流の領域であった (Fig. 10)。

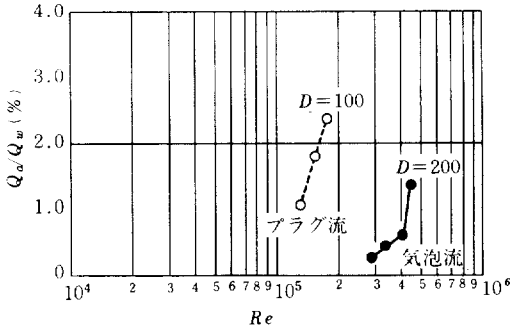


Fig. 10 サイホン部に空気塊が発生しない Re 数と空気混入比の関係

2 空気塊を発生させない水理量の相似性

100mm管と200mm管との幾何学的な縮尺比と空気塊を発生させない流速比との関係を(2)式を仮定することにより検討することとする。

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 V_2 : 200mm管の流速値
 V_1 : 100mm管の流速値
 D_2 : 200mm管の管径、 D_1 : 100mm管の管径
 n : 指数。

100mm管と200mm管のそれぞれの管路について求めた回帰式を基に、空気混入比1.0%前後の同一混入比のデータより、 V_2/V_1 の値から n の値を求めると、その範囲は $n=0.47\sim 0.51$ であった。 $n=0.5$ では、フルードの相似則に従うこととなる。

次に、空気混入比と管径を代表長さとしたフルード数 ($F_r = V/\sqrt{g \cdot D}$, V : 流速, g : 重力加速度, D : 管径) の関係から、空気塊を発生させない実験値を整理すると Fig. 11となる。

空気混入比とフルード数とのそれぞれの無次元量から整理されたデータは、ほぼ一つの直線上に存在しており、100mm管と200mm管の管路間の縮尺効果は見い出されない。

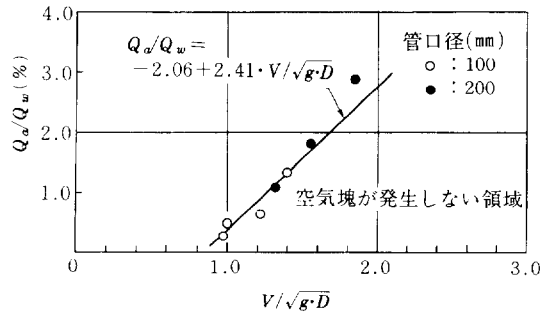


Fig. 11 サイホン部に空気塊が発生しない $V/\sqrt{g \cdot D}$ と空気混入比 Q_a/Q_w の関係

このことは、空気混入比と $V/\sqrt{g \cdot D}$ の値を一致させることにより、空気塊の発生に係わる模型と原型との相似性が確保可能であることがわかる。

3 空気塊の発生機構

空気塊の形成過程は、以下のように説明ができる。

プラグ状の大気泡及び無数の小気泡が、その浮力により管頂部に滞留し、管路線形変化点に空気塊を発生させる。空気は、上流から流水により空気塊へ供給され、下流では跳水現象に似た流れの乱れにより、下流の満水管路へ連行される。この空気量の連続性は、空気塊がある容積及び圧力に達した時点で平衡状態となり、その結果定常的流況を呈することとなる。

空気塊下流端での空気連行は、下流の液相部において乱れにより空気塊の圧力よりも低い部分が発生し、このため空気塊から気泡状の空気が混入される形態で成される。但し、この場合、この圧力差が気相と液相の境界面に働く表面張力に打ち勝つ前提条件が必要となる。

Fig. 12に示す模式図を考えると、 Q_{ai} が Q_{a0} よりも大きい時は、空気塊は成長し、逆に Q_{ai} が Q_{a0} よりも小さい時は、空気塊は消滅して行く。

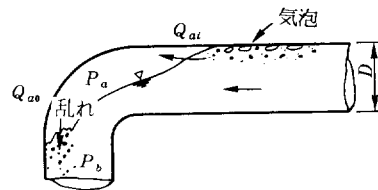


Fig. 12 空気塊における空気の流れ

Q_{a0} については、空気塊内外の圧力差 ($P_a - P_b$) と流れの乱れの程度が影響するものと考えられる。空気塊内外の圧力差は、管内跳水前後のエネルギー損失差に対応するものであり、 P_a と P_b の差がこれに相当する。このエネルギー差は、跳水前のフルード数に依存するものである。又、Kalinske と Robertson⁶⁾は、管水路の実験から跳水による空気混入比を(3)式で表している。

$$Q_a/Q_w = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 F_1 ：跳水前のフルード数（代表長さは、管内水深）。

但し(3)式は、気相部は大気圧の条件下にある。

前節での実験結果から空気塊の発生は、 $V/\sqrt{g \cdot D}$ と空気混入比により規定されることが明らかとなったが、(3)式についても下流への空気混入比は、フルード数の関数となっている。空気塊を発生させないためには $Q_{ai} < Q_{a0}$ の条件が必要であり、結局は Q_{a0} の値に依存している。 Q_{a0} の値は、フルード数による P_a と P_b の圧力差の関係であり、本実験では、フルード数の算定において、代表長さを D と仮定しているため、開水路流れを形成する上流からの空気量も考慮する必要があるわけである。

4 空気塊の形状とその相似性

次に、サイホン頂部で発生する空気塊の形状に関する相似性を検討することとする。

まず目視観察及び空気塊の写真を基に、ほぼ形状が幾何学的に相似なデータを整理すると、Table 1の通りとなる。なお、実験ケースは、離散化された水量により設定されているため、厳密な空気塊の相似は、設定値の中間値で発生していると考えられる。

Table 1のデータから、流速についての縮尺比との関係を調べるために、Fig. 13に、それぞれの流速値を示す。

本図から、プロット点はほぼ原点を基点として、45°の傾きを持った直線を描いている。このことから、流速値を一致させることにより、空気塊の形状に関する相似性が保たれることがわかる。これを、流量に置換えて相似関係を示すと(4)式となる。

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{2.0} \dots\dots\dots(4)$$

$$V_2 = V_1$$

ここに、 Q_2 ：200mm管の流量

Q_1 ：100mm管の流量。

又、空気混入流では、空気量についても何らかの相似関係を明らかにする必要があるため、Fig. 14に流速値が一定のデータから、かつ、空気塊が相似に保たれる空気

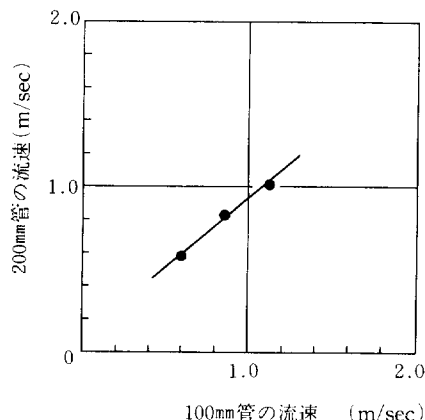


Fig. 13 空気塊の形状が相似なデータにおける管径間の流速の関係

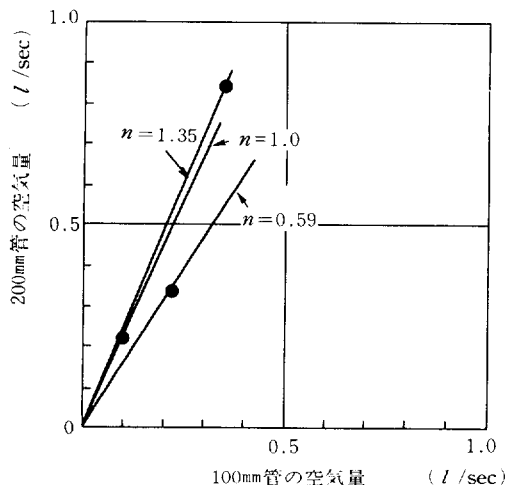


Fig. 14 空気塊の形状が相似なデータにおける管径間の空気量の関係

量の200mm管と100mm管とのデータを整理した。

同一流量において100mm管で発生する空気塊と相似なものを形成されるためには200mm管では、100mm管の空気量の1.50～2.55倍の空気量を流下させる必要がある。従って、(5)式の相似関係があることが推察される。

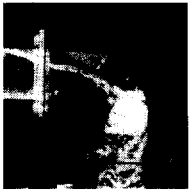
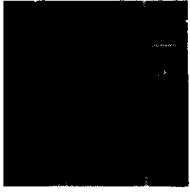


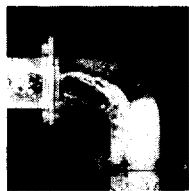
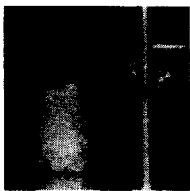

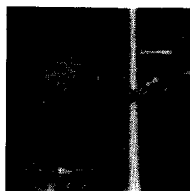
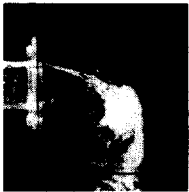

$$\frac{Q_{a2}}{Q_{a1}} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n \dots\dots\dots(5)$$

(但し $0.59 \leq n \leq 1.35$)

ここに、 Q_{a2} ：200mm管での空気量

Q_{a1} ：100mm管での空気量

Table 1 空気塊の形状が相似な実験ケースの対応表

	100mm				200mm			
	Q_w	Q_a	V	流況	Q_w	Q_a	V	流況
	(m ³ /sec)	(m ³ /sec)	(m/sec)		(m ³ /sec)	(m ³ /sec)	(m/sec)	
1	0.00470	0.00011	0.598		0.0180	0.00022	0.571	
2	0.00876	0.00033	1.120		0.0328	0.00084	1.045	
3	0.00470	0.00022	0.598		0.0180	0.00033	0.571	
4	0.00876	0.00022	1.120		0.0328	0.00033	1.045	
5	0.00677	0.00011	0.862		0.0262	0.00022	0.833	

n : 指数。

以上により、空気塊の形状についての相似性については、水流量については(4)式、又空気量については(5)式を少なくとも成り立たせる必要がある。

5 空気塊によるエネルギー損失水頭

サイホン部等の管路線形変化部では、空気塊の影響により大きなエネルギー損失が生じる。

本実験のサイホンでは、下流の下り勾配に変化する屈曲部に大きな空気塊が形成された。又、下流の水平部へ移行する部分でも、気泡の集積が見られた。これらの空気の集積・滞留は、管水路の管内水位を低下させ、摩擦

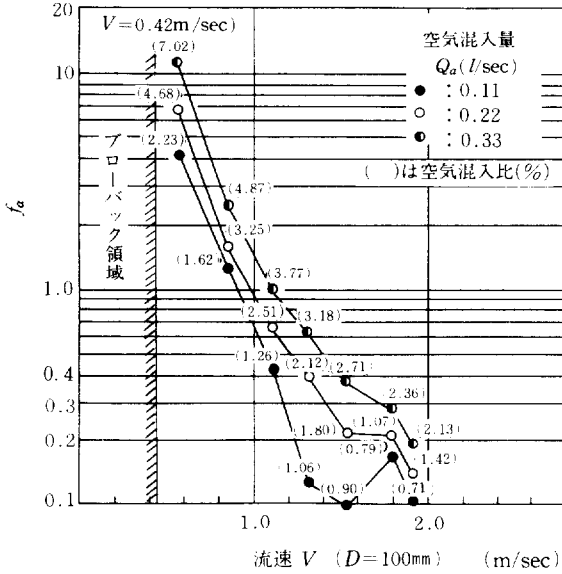


Fig. 15-(1) 空気混入量 Q_a ごとの流速 V と空気による局所損失係数 f_a の関係

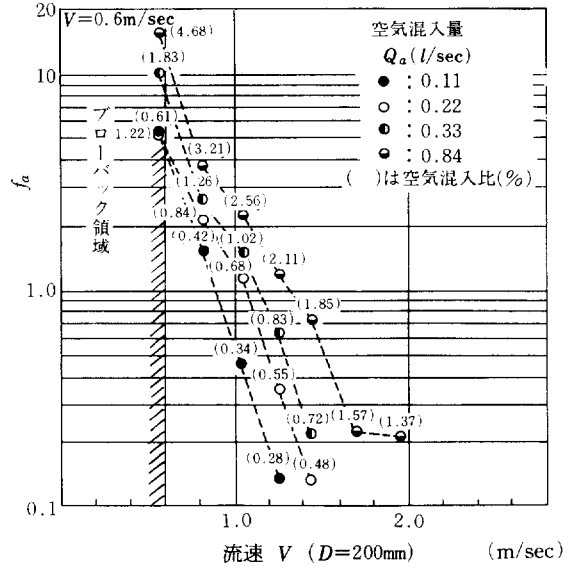


Fig. 15-(2) 空気混入量 Q_a ごとの流速 V と空気による局所損失係数 f_a の関係

Table 2 空気塊の形状が相似な実験ケースにおける空気による局所損失係数の比較表

管径 水理諸量 実験 ケース	100mm				200mm			
	Q_w	Q_a	V	f_a	Q_w	Q_a	V	f_a
1	(m^3/sec) 0.00470	(m^3/sec) 0.00011	(m/sec) 0.598	4.17	(m^3/sec) 0.0180	(m^3/sec) 0.00022	(m/sec) 0.571	5.29
2	0.00677	0.00011	0.862	1.26	0.0262	0.00022	0.833	2.12
3	0.00876	0.00033	1.120	0.97	0.0328	0.00084	1.045	2.28
4	0.00876	0.00022	1.120	0.67	0.0328	0.00033	1.045	2.12

損失を増加させたり、跳水や流れの乱れにより、局所損失をかなり増加させる要因となる。

この空気による管路変化点でのエネルギー損失を局所損失と仮定して、(6)式による損失水頭計算式を適用することとする。

$$\Delta h_a = f_a \cdot \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (6)$$

- ここに、 Δh_a ：空気による局所損失水頭 (m)
- f_a ：空気による局所損失係数
- V ：見かけ平均流速 (m/sec)
- g ：重力加速度 (m/sec²)

Δh_a は、単相流のサイホン部間でのエネルギー損失水頭と、空気混入時の損失水頭の差として求めることができる。流速については、空気による縮流作用により局部的に流速は増加するが、満流時の平均流速を適用するものとした。

空気混入量別に、流速と f_a の関係を Fig. 15-(1)~(2)に示す。 f_a は、ブローバック現象を抑える流速値を極値として、流速が増加するのに伴い減少している。これは、流速の増加により、空気塊の成長が妨げられるためである。空気塊を完全に消滅させる流速値は、100mm管と200mm管では、異なる値を示すことから $f_a = 0$ になる流速値も管

径ごとに異なっている。

f_a の値についての縮尺効果について検討すると、まず局所損失は空気塊の形状により決定されると仮定した場合、空気塊の形状についての相似関係は4節において明らかにしたが、その相似関係に合致する実験条件の f_a の値を比較すると、Table 2となる。

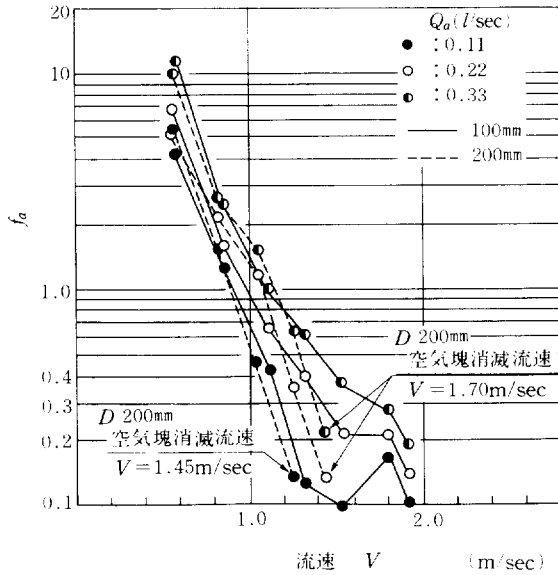


Fig. 16 空気混入量ごとの流速Vと空気による局所損失係数の関係

空気塊の形状に関する相似関係からは、 f_{a2}/f_{a1} は1.27~2.35の間の値を示した。 f_a の値は、本来、無次元量であるから、縮尺効果を消去する相似関係を見出すべきと考えられる。

Fig. 16において、100mm管と200mm管のデータを比較すると、流速と空気量を一致させることにより f_a の縮尺効果が無視される流速域が存在することがわかる。 f_a が一致しない領域は、100mm管と200mm管との空気塊の発生に係わる限界流速が相違する領域であることから、説明することができる。従って、 f_a については、それぞれの管径の持つ空気塊を発生させる流速領域において、流速と空気量を一致させることにより、定量的解析が可能と考えられる。

なお、本実験では、1/2と縮尺比が大きいため、空気量の影響が定量的に大きく生じないことも考えられるため、縮尺比の小さい場合には、その効果について解析を深める必要があると考えられる。従って、流速と空気量を一致させることのできる範囲は、比較的縮尺比の大きい模型に限られると推察される。

VI 結 言

本報文では、1:2の比較的大きな縮尺比を有する二つの管路の空気混入流の水理実験からその水理現象の縮尺効果とその相似性について解析を行った。

その結果、流況の遷移については、流速とレイノルズ数が支配的であり、その他の水理挙動については、フルード数及び流速が支配的であった。Table 3では、各水理現

Table 3 管路内空気混入流の相似関係一覧表 (100mm管と200mm管との対比)

D:原型, m:模型

水 理 現 象	相 似 関 係
流況の 層状流→プラグ流	流速一致 ($V_p = V_m$)
遷移 プラグ流→気泡流	レイノルズ数 ($Re = \frac{VD}{\nu}$)
ブローバック現象	$\frac{V_p}{V_m} = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^{0.54}$
空気塊の発生	フルード数 ($Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$), 空気混入比 (Q_a/Q_w)
空気塊の形状	流速一致 ($V_p = V_m, Q_p/Q_m = (D_p/D_m)^{2.0}$), 空気量 ($\frac{Q_{ap}}{Q_{am}} = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^n, 0.59 \leq n \leq 1.35$)
局所損失係数	流速一致 ($V_p = V_m$), ($Q_{ap} = Q_{am}$)

象についての水理諸量間の相似関係を示した。

このように、空気混入流に関する相似関係がある程度明らかにできたことにより、従来定性的な解析に止まっていたこれらの水理実験がこの相似関係を利用することにより、定量的な解析が成されることが期待される。

なお、本研究では、比較的大きな縮尺比の現象について検討を行ったが、今後、更に小さな縮尺比についても、今回明らかにした相似関係が成立するかどうか検討する必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁(編)(1971)：応用水理学，下 1 水理実験，丸善
- 2) Le Me'haute', Bernard, 堀川清司(訳) (1979)：応用流体力学入門，東京大学出版会
- 3) 日本流体力学会 (1987)：流体力学ハンドブック，丸善
- 4) 中 達雄ほか(1987)：起伏のある管路における空気混入流の水理挙動，農士試技報，174 (HE-6)，1～12
- 5) Wisner, P., Mohsen, F.M. and Kouwen, N. (1975): Removal of air from water lines by hydraulic means, *proc. Am. Soc. Civil Eng., J. Hydraul. Div.*, 101 (2), 243～257
- 6) Kalinske, A.A. and Robertson, J.M. (1943): Closed conduit flow, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 108, (2205), 1435～1516