

開水路から管路流への遷移時における水位および空気形状と移動速度の画像計測方法

Image measuring for the water level and bubble shape and velocity at the transition phenomenon from open channel to pipe flow

松本良一*・富所五郎**・澤 洋一郎***

By Ryoichi MATSUMOTO, Goro TOMIDOKORO and Yooichiro SAWA

Various two-phase(water-air) flows occur in underground pipes like large sewer. When the pipe is filled gradually with water at flood, air may become large bubble. Then, for the purpose of researching the bubble behavior at the transition phenomenon from open channel to pipe flow, we developed the laboratory system for automatic controlled inlet discharge and image measuring water level and bubble shape and velocity. The system was constructed by motor valves, magnetic flow meters, video cameras etc. The maximum error is less than 3%. The system is useful for research of the transition phenomena.

Keywords: two-phase(water-air)flow, transition phenomenon,
automatic controll system, video image mesurement

1. はじめに

近年、都市化に伴って計画事例が多い大深度・大口径の地下河川や第2世代下水道計画では、雨水の流入により管内の流れが開水路から管路に遷移する。このとき、管渠内の空隙率が急激に減少し、閉塞された空気は管渠を移動して地上に噴出し、マンホールの蓋を飛散させたりする原因となることは目視で観察できるが、空気容量と空気の移動速度を定量的に計測できる既往の装置はない。そして、これらは非正常で起こる現象であり、管渠内に閉塞される空気の挙動は、管渠内の水面上昇速度（閉塞率）を精度よく再現することが重要で、そのためには管渠への流入量を精度よく再現する装置が必要である。

本研究では、流入量を電動バルブ、電磁流量計などを複数台設置して自動制御を行い、さらに管内に閉塞される空気の挙動をビデオカメラを使った画像解析で特定して、空気形状と移動速度およびその容量を定量的に計測できるシステムを開発した。これにより、開水路から管路流に遷移する非正常現象において、実験条件である流量を精密に制御し、管内に閉塞される空気の形状と移動速度を計測できるようになり、今後の遷移流実験の精度向上に寄与できると考える。

* 正会員 工修 技術士（建設部門） 株式会社 建設技術研究所 フロント事業部 課長 川越分室
(〒350 埼玉県川越市萱沼 2503 電話 (0492) 35-3495)

** 正会員 工博 信州大学 教授 工学部 社会開発工学科
(〒380 長野市若里 500 電話 (026) 226-4101)

*** 非会員 工博 沼津工業高等専門学校 教授 電子制御工学科
(〒410 沼津市大岡 3600 電話 (0559) 26-5831)

2. 実験システムの概要

実験機器の構成を図-1に示す。画像計測サブシステムは、3台のカラービデオカメラをパソコンで自動操作して管内の水面位置を撮影し、撮影された映像は、任意の画像フレームをパソコンで検索してフレームデータを読み込み、水と空気の境界座標を輝度分布から特定して、管内の水面形状（気液境界）と空気の移動速度を計測できるシステムである。図-2より、ビデオカメラにより再生された映像信号は、フレームメモリーから画像入力装置に入り、パソコン画面とともにCRTに出力され、同時に映像信号はカラーモニタに出力される。画像入力装置に取り込まれた映像はフレームメモリーへの制御信号により、VTRからの映像信号1フレームをフレームメモリー内に一時的に記憶させておくことができ、ノイズのない映像を取り込む。また、VTRへの制御信号により、ビデオテープの再生、一時停止および指定タイムコードへの早送り、巻戻し等を行っている。

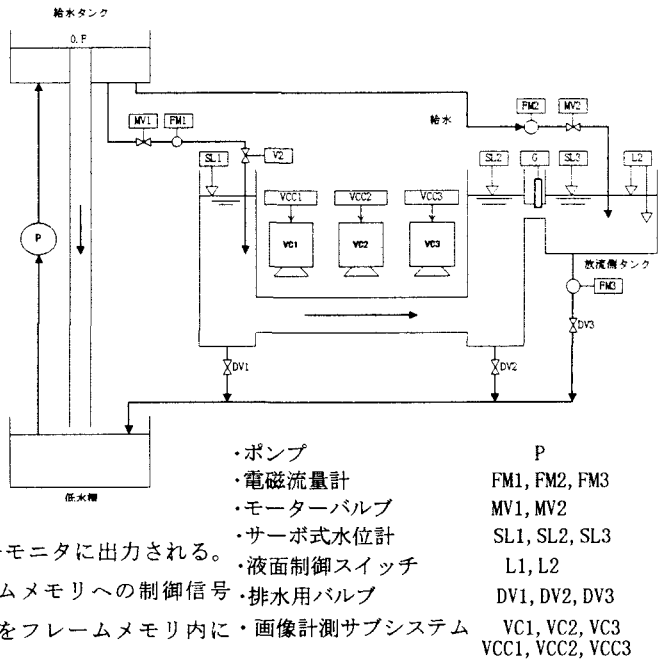


図-1 主要機器の構成

3. 円管内水位の測定原理

模型は全長20m、外径110mm、肉厚10mmの透明アクリル円管を使用しており、管内の水位および空気の挙動を外部からビデオカメラで撮影できる。ビデオカメラの映像中心が、図-3に示すように円管上部の点Iと水平になるようにビデオカメラを設置した。撮影にあたり、管断面を横から写した像（以下、実像と呼ぶ。）と共に、上で述べた水平線に対して45°手前に傾けた鏡によって放水路断面を上から写した像（以下、鏡像と呼ぶ。）も同時に撮影する。

ビデオ映像をパソコン画面（解像度：水平方向640[dot]垂直方向400[dot]）に取り込み、水平方向の中心位置で垂直方向に変化する水面の位置を画像処理により検出し、対応する画素数[dot]を基に水位を計測する。そのために、図-3に示すように映像中心から円管の中心位置までの距離 l とビデオ映像の焦点距離 f

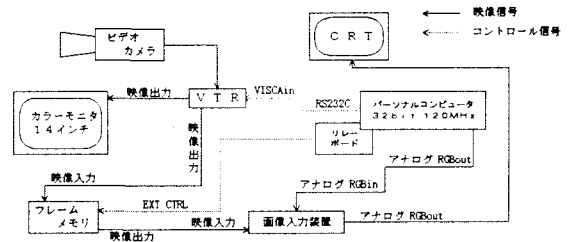


図-2 画像計測サブシステムの機器構成

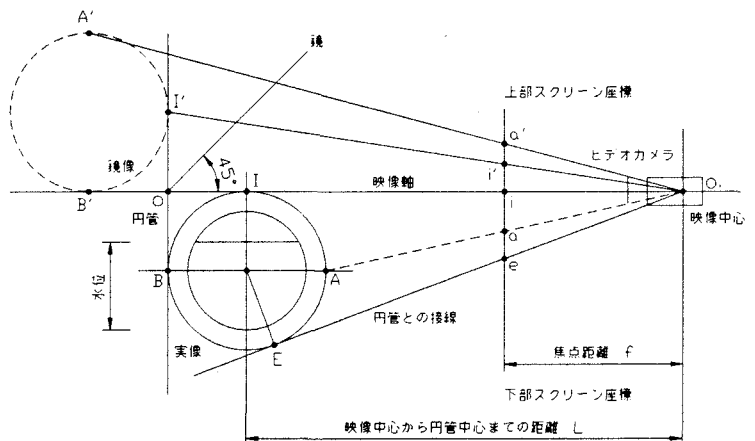


図-3 実験装置の断面

および実長と画素数の換算係数 k [mm/dot] を知る必要がある。但し、焦点距離と換算係数の値は個々に知る必要はなく、その比 f/k を求めればよい。距離 L と f/k の値は、被写体が円形（半径 R [mm]）であることを利用し、事前に点 A 、 E に対応する画面上の点の座標を点 I に対応する画面上の点の座標を基準として計った画素数（以下スクリーン座標と呼ぶ。） a および e を用いて幾何学的に、それぞれ（１）および（２）式となる。

$$L = \frac{eR}{2a-e} \tag{1}$$

$$\frac{f}{k} = \frac{2a(e-a)}{2a-e} \tag{2}$$

図－４より実像の水面位置 P を水位 H とし、円管の肉厚 t による屈折を考慮して（３）式となる。

$$H = (R-t)(1 + \sin \Psi) \tag{3}$$

ここで、直線 OP が映像軸となす角 Ψ は、

$$\Psi = \phi + \beta + \alpha' - \beta' \tag{4}$$

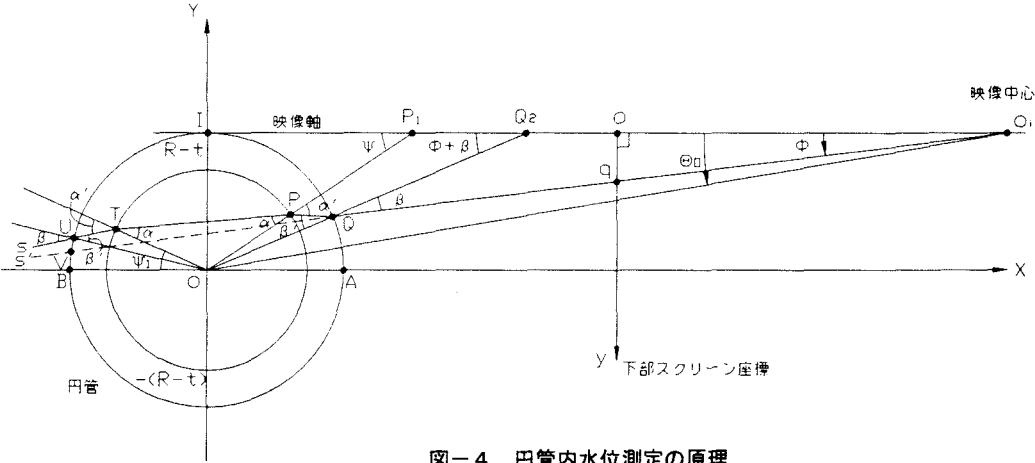
となる。ここに、 ϕ は点 Q （見かけ上円管に現れる水面位置）と映像中心を結ぶ線が映像軸となす角、 β 、 β' は円管の左方から映像中心に向かう光線 s の管壁への入射、屈折角で、 α' は光線 s の管の肉厚内部での入射角である。屈折角 β' は、円管材質の空気に対する屈折率を n として（５）式である。

$$\sin \beta' = \frac{1}{n} \sin \beta \tag{5}$$

さらに、角 α' と角 ϕ と入射角 β の関係は幾何学的に（６）式となる。

$$\sin \beta' = \frac{R-t}{R} \sin \alpha' \quad , \quad \sin \beta = \frac{\sin(\theta_0 - \phi)}{\sin \theta_0} \quad , \quad \phi = \arctan \frac{q}{fk} \tag{6}$$

ただし、 $\theta_0 = \arctan(R/L)$ である。同様にして鏡像より円管内水位 H についても算定できる。



図－４ 円管内水位測定の実理

4. 実験システムの精度

4.1 流入量の制御精度

一般に、実験にあたっては対象とする現象の再現性を高める必要がある。本実験では開水路から管路流に遷移する時の空気の挙動を把握することが目的であり、都市部における降雨パターンより、流入開始（実験開始）から洪水ピーク時までの間に管路流になる場合が多いため、この時間帯での再現精度が高まるようにシス

表－１ 流入量の再現性比較

NO	時刻 (秒)	計画流量 (l/s)	実験流量 (l/s)	水位差 実験－計画 (l/s)	適合度 実験／計画 (%)	備考
1	31	0.90	0.92	0.02	102	実験開始
2	61	1.03	1.05	0.02	102	
3	91	1.17	1.14	-0.03	97	
4	121	1.30	1.28	-0.02	98	
5	131	1.43	1.43	0.00	100	
6	167	1.50	1.48	-0.02	99	ピーク時
7	211	1.36	1.47	0.11	108	
8	241	1.27	1.34	0.07	106	
9	271	1.18	1.28	0.10	108	
10	301	1.09	1.19	0.10	109	
11	331	0.99	1.05	0.06	106	
12	361	0.90	1.01	0.11	112	
13	391	0.81	0.88	0.07	109	実験終了

テムを設定する。これにより、電磁流量計とモータバルブの応答速度の設定を、再現性が重要な部分に集中して行う利点がある。この方法により、給水流量を調整して任意の洪水波形や放流タンクの水位を模型上に再現した結果を表－１に示す。表－１より洪水波形流量の再現性の指標となる適合度（実験流量と計画流量の比率）は、実験開始からピーク時に至るまでは９７％～１０２％で流量の最大誤差は３％以内となり実用上十分な精度が確保できたと考えられる。

4.2 円管内水位の精度

画像計測方法の有効性を確認する目的で、円管に界面活性剤で表面張力を抑えた着色水を一定量ずつ注入し、水面が安定した後に管軸方向からポイントゲージを用いて水位を測定すると同時に、円管内の水面位置をビデオカメラで撮影して図－５に校正実験の結果を示す。横軸に実測水位を、縦軸にパソコン画面上の座標より算出した計算水位を取り、対応する点をプロットした。図中の直線は、実測水位と計算水位とが一致する理想的な線を表わしており、水位の最大誤差は２．５８mmで満水位に対して３％以下となり、良好な一致を得た。水位の測定精度に及ぼす主要因は、透明アクリル円管の屈折率、円管内水位測定の基本量となる点１から映像中心 O_1 までの距離 L 、焦点距離 f とスクリーン座標・実長間の換算係数 k との比 f/k の算定誤差であり、以下に列記した。

(a) 屈折率による誤差

透明アクリル円管の屈折率 n は１．２４とした。これは、(１)～(６)式において、 n の値を１から１／１００づつ増加させた場合の計算水位と、ポイントゲージによる測定との誤差の２乗和が、最小となるときの n の値である。そして、円管による屈折がない場合($n=1$)とある場合($n=1.24$)による計算水位とパソコン画面上のスクリーン座標との関係を図－６に示した。横軸のスクリーン座標で約２００から３７０[dot]における曲線は実像を、約１８０[dot]以下における曲線は鏡像を表わす。図から、実像については、水位ゼロ付近および満水時(水位９０mm)において屈折率の影響が強く、それらの中間の水位ではほとんど屈折率の影響が少ない。鏡像については逆に、満水時付近では屈折率の影響はほとんどなく、水位が円管内の半分程度の場合に屈折率の影響が強くなる。このため、円管内の水位によって実像と鏡像を組み合わせた水位測定を行うことで精度が向上する。

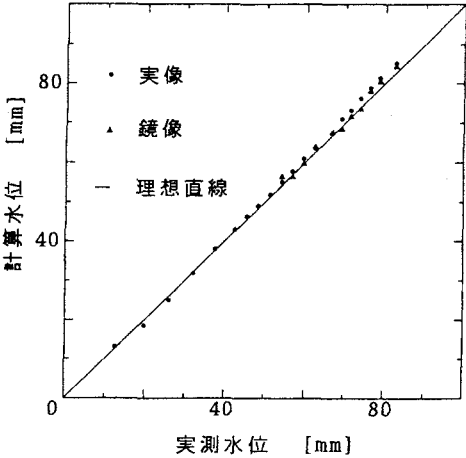
(b) 距離Lの誤差感度

測定値 L の真値を L' 、 e の真の値を e' 、読み取り誤差を Δe として e を $e=e'+\Delta e$ と表現し、 $\Delta e \ll (2a-e')$ とすれば、高次の誤差を無視して長さ L の誤差である ΔL と、誤差感度 K_L は(７)式となる。

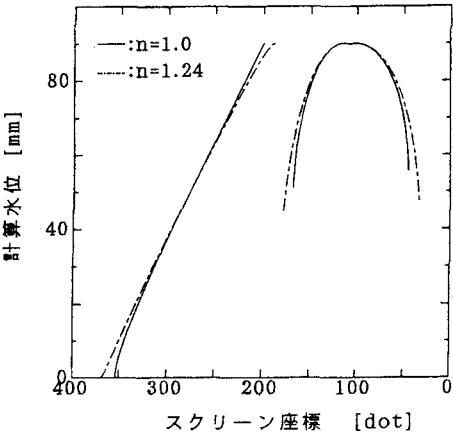
$$\frac{\Delta L}{L'} = K_L \frac{\Delta e}{e'}$$
$$K_L = \frac{2a}{2a-e'}$$

(7)

本実験では $a=98$ [dot]、 $e'=178$ [dot] であり、読み取り誤差 Δe を１ [dot] (約０．５％) とすれば、 $K_L=10.89$ となるので L の誤差は約６％となる。



図－５ 校正結果



図－６ 屈折率による計算水位の差

(c) f/k の誤差感度

しと同様に測定値 e について誤差 $\Delta(f/k)$ と誤差感度 K_2 は (8) 式となる。ここに、 $(f/k)'$ は測定値 (f/k) の真値である。

$$\frac{\Delta(f/k)}{(f/k)'} = K_2 \frac{\Delta e}{e'} \quad K_2 = \frac{ae'}{(2a-e)(e'-a)} \quad (8)$$

(b) と同様に a 、 e' の値から、読み取り誤差 Δe を 1 [d o t] (約 0.5%) とすれば $K_2 = 12.11$ となるので f/k の誤差は約 7% となる。

以上より、水位の測定精度を確保するためには、計測の基本量である距離 l および焦点距離と換算係数の比 f/k を正確に把握する必要がある。

5. 空気の移動速度と容量の算定^{1), 2)}

5.1 算定方法

前節までに述べた原理と方法により、円管内への水の流入量、すなわち、管内空気の閉塞加速度の再現精度と円管内における水位 (気液境界) の測定精度が確保されたため、このシステムを使って管内に閉塞される空気の移動速度を算定した。

(a) 空気の移動速度の算定

記憶された映像から気液境界を検出するために二値化とフィルタリングを行った。二値化におけるしきい値は、その点の属する縦のラインの輝度の平均とし、フィルタは細線化フィルタを用いた³⁾。水位の自動検出においては、一つ前の映像で検出した水位に一番近い境界を水位としている。検出された水位のデータから実際の水位の値を算定した。図-7の (a)、(b) はパソコン画面上の鏡像部と実像部を表わしており、気泡の移動速度 v は、ビデオ映像のサンプリングの刻みを 1 フレーム ($= 1/30$ 秒) とすることで、その間に空気塊の先端が移動した距離 Δx を用いて、 $v = 30\Delta x$ より算定できる。

(b) 空気容量の算定

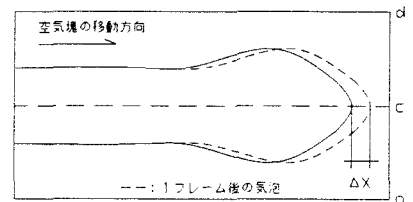
円管断面図-7 (c) において、水面が円管に接する点を P、Q とし、2 点間の水面は線形に変化すると仮定して、空気塊の断面積 ΔA は (9) 式より求めることができる。

$$\Delta A = \frac{r^2 \left[\pi - (\Psi_P + \Psi_Q) \right]}{2} - \frac{r^2}{2} \sin(\Psi_P + \Psi_Q) \quad (9)$$

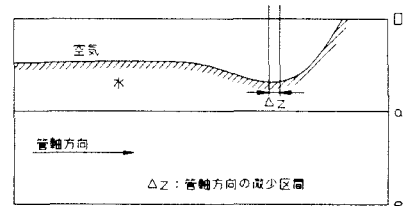
ここに、 r は円管半径、 Ψ_P は円管中心 O を通る水平線と OP がなす角、 Ψ_Q は円管中心 O を通る水平線と OQ がなす角で、断面積 ΔA を積分していくことで空気の体積 (空気容量) が算定できる。

5.2 画像解析

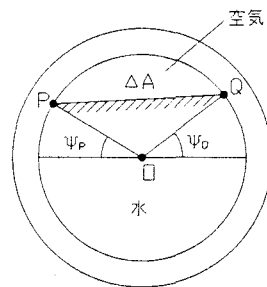
実験システムの実用性を確かめるために、表-1 の流量を実験装置に通水したときに管内流況を撮影して円管内水位、空気容量とその移動速度を解析した。実験ではビデオカメラを流入地点 (VCR1)、中央 (VCR2)、下流端付近 (VCR3) の 3 ヶ所に設置し、円管内水位を自動検出した結果を図-8 に示す。この結果から、ある水位に到達する各ビデオカメラのタイムコードの差から、管内の流れが上流から下流に流れていることが分か



(a) 鏡像部



(b) 実像部



(c) 断面

図-7 空気塊の移動速度と空気容量の算定

り、管内における水面上昇速度が逆算できる。次に、VCR2により撮影されたビデオデータから空気容量と移動速度を計測した。空気容量の計測結果を図-9に示す。処理時間は空気先端が現われてから1秒間(=30フレーム)とした。図から、流れにより最大200cm³程度の空気が円管内にできることが分かる。図-10に空気の移動速度の解析結果を示した。図から、気泡の移動速度は最も速いもので平均54.4cm/s程度であった。

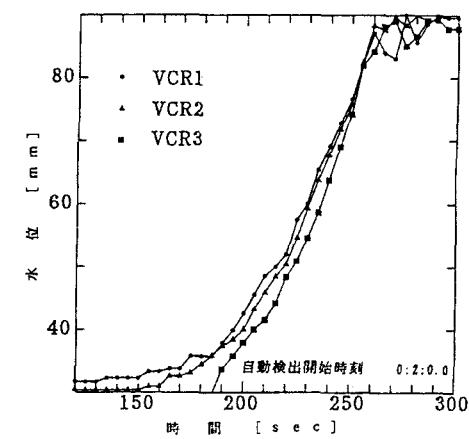


図-8 管内水位の自動検出結果

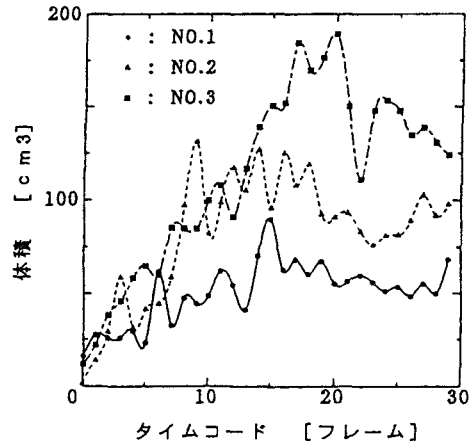


図-9 空気容量の計測結果

6. 結 論

本論文では、開水路から遷移流を経て管路流にいたる非定常の水理現象を対象として、管に流入する流量を制御し、同時に管内水位（空気形状）と管内に閉塞される空気の移動速度と空気量を計測できるシステムを開発し、自動制御と画像解析の有効性を示した。

したがって、今後に増加する大深度、大口径の下水道幹線計画や地下河川計画においては、本研究の成果が十分活用できると考えられる。

今後の課題としては、画像解析の精度を向上させるためにパソコンの画面解像度を高めること、本システムを使って計測した空気容量を検証することである。また、管が大深度、大口径になればなるほど、空気の圧縮性などを考慮する必要があるが、実験で得たデータから実物における空気の挙動を推定する相似則が確立されていないため、現地観測資料を蓄積する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本写真測量学会編：写真による三次元測定－応用写真測量－、共立出版、pp.1-11、1983.
- 2) 木本氏寿：新版 写真測量の実際、山海堂、pp.1-39、1990.
- 3) 安居院、中島：基礎情報工学シリーズ18 画像情報処理、森北出版、pp.15-260、1991.

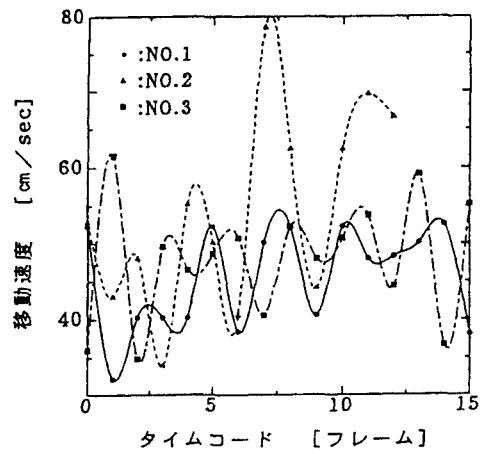


図-10 空気の移動速度の計測結果