

管水路の送水開始時の流れについて

西山 壮一

I ま え が き

水の流れを予測することは水の管理上、施設の安全上重要な問題である。自然流下系管水路の送水開始時における流れの様子はバルブが上流にある場合と下流にある場合によって全く異なる。

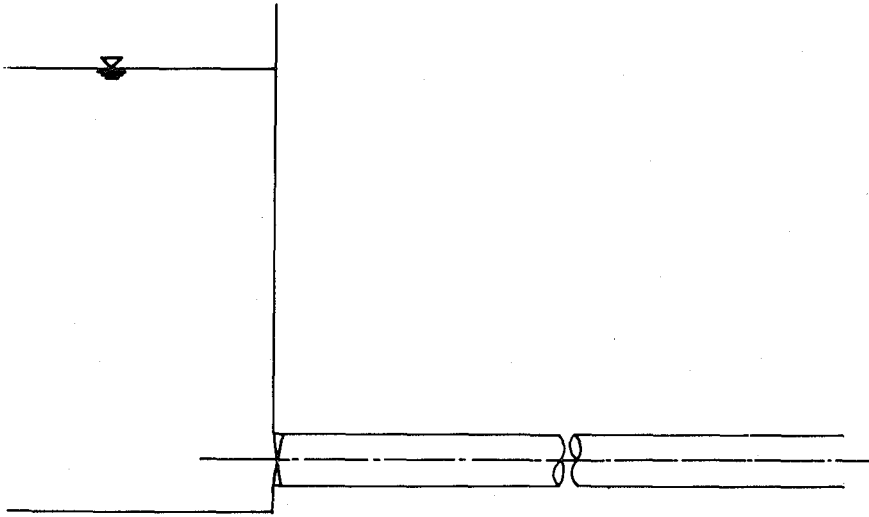


Fig. 1. タンクと単一パイプ
(バルブが上流端にある場合)

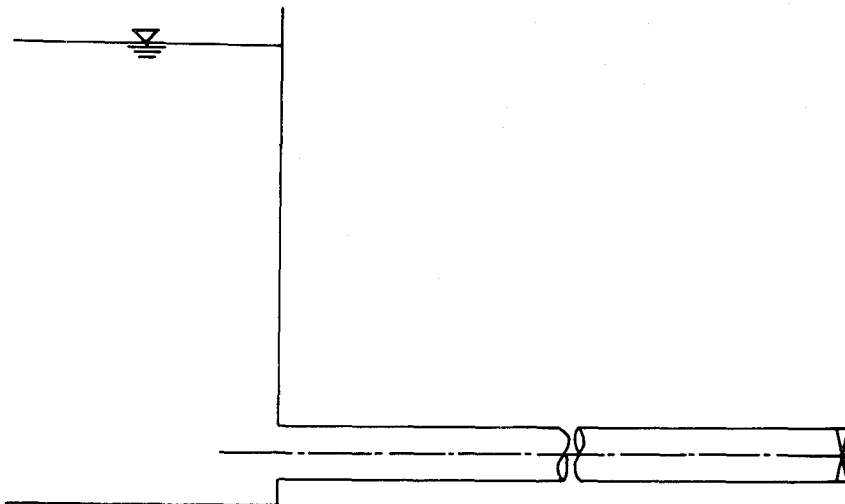


Fig. 2. タンクと単一パイプ
(バルブが下流端にある場合)

簡略化のため、Fig1, Fig2 のような貯水池から単一パイプで放流する場合について考える。Fig1 のようにバルブが上流にある場合、バルブ閉鎖時は管内に空気が充滿して、バルブ開放とともに自由水面を有する流れとなり、次第に満流していく。このような流れはいわゆる管水路の流れではない。Fig2 のようにバルブが下流にある場合管は圧力管である。下流端のバルブを開放すると流速は次第に大きくなり、一定の流速に近づく。このような流れの問題はバルブ開放からいわゆる定常状態に達するまでの時間の遅れである。特に長距離パイプラインで考慮する必要がある。単一パイプで且つ、バルブを急開放した場合の送水開始時の流れを計算する式は従来からあったが本論文では複雑なパイプラインにも適用でき、また任意のバルブの開放も考慮できる一般的な解析方法を示したものである。なおバルブ地点でバルブ開放により圧力は急降下するがWaterhammerほどには問題にならない。バルブの開放時間により二つにわけられる。

- (1) 急開放 圧力波の往復時間より速く開放する場合
- (2) 緩開放 圧力波の往復時間よりおそく開放する場合

II 記号の説明

H	: 水頭
HR	: 貯水池の水頭
H_v	: バルブ閉鎖時におけるバルブ地点の水頭
V	: 管内平均流速
V_{max}	: 到達しうる最大の管内平均流速
x	: 距離
t	: 時間
f	: Darcy - Weisbach式の中のまじつ係数
f_e	: 流入損失係数
D	: 管径
L	: 管の長さ
A_p	: 管の断面積
a	: 圧力波の伝播速度
θ	: 管が水平となる角度
γ	: 水の単位重量
T_0	: バルブの開放時間
T	: バルブ開放開始時よりの経過時間
g	: 重力の加速度

III 単一パイプで急開放の場合の流れについて

Fig2でバルブを開放し、定常状態になった後、貯水池と下流端の間にベルヌーイの定理を適用すると次式が得られる。

$$HR = f_e \frac{V_{max}^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{V_{max}^2}{2g} + \frac{V_{max}^2}{2g} \quad (1)$$

バルブを急開放したとき流れに対する運動方程式は⁽¹⁾

$$\gamma A_p \left\{ H_v - \left(f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + f_e \frac{V^2}{2g} \right) \right\} = \frac{\gamma A_p L dV}{g dt} \quad (2)$$

(1), (2)より流速と時間の関係は

$$T = \frac{LV_{max}}{2gH_v} \ln \frac{V_{max} + V}{V_{max} - V} \quad (3)$$

(3)式よりVが V_{max} になるには数学的には無限の時間がかかることになる。 V_{max} の99%以上に達したときを定常状態とみなすと⁽²⁾, (3)式より定常状態になるまでの時間 T_s は L/H_0 と V_{max} に比例することがわかる。 $V_{max} = 1$ として、 T_s と L/H_0 の関係をFig.3に示す。

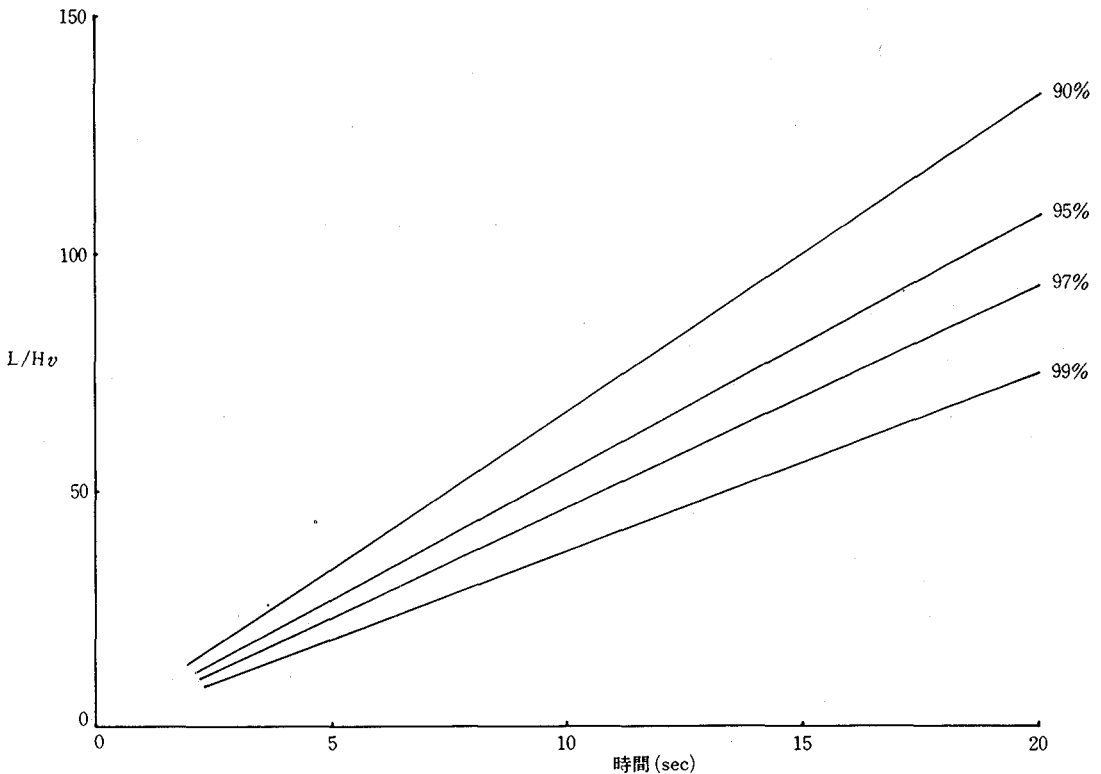


Fig. 3. 定常状態に達する時間と L/H_0 の関係

Fig.3より簡単なパイプで比較的時間が速い場合は容易に求めることができる。たとえば $H_0 = 0.8\text{m}$, $L = 30\text{m}$, $V_{max} = 1.1\text{m/sec}$ とすると Fig.3より $T_s' = 10.7\text{sec}$, $V_{max} = 1.1\text{m/sec}$ だから $T_s = 11.8\text{sec}$ 。

IV バルブ開放時間がおそい場合、あるいは複雑な管の場合の解析

このような場合は管水路の非定常流の基礎方程式を直接解く方法で解析しなければならない。ここでは管水路の非定常流の基礎方程式を解いて、理論的に解析し、Fig.2のような実験装置を使って、実験を行ない、理論値、実験値の比較を行なった。

1. 理論解析

管水路の非定常流を支配する式は次の運動方程式と連続の式で与えられる。

運動方程式

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} \dots (4)$$

連続の式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2 \partial V}{g \partial x} + V \sin \theta = 0 \dots (5)$$

(4), (5)式は特性曲線法で解析できる。波動問題に最初に特性曲線を導入したのは Riemann⁽³⁾であり広く使われている。特性曲線の誘導はすでに多く述べられているのでここでは省略する^{(4), (5), (6)}

境界条件

上流 貯水池があり水位一定。

下流 スルースバルブがある。損失係数の変化⁽⁷⁾をTable 1に示す。

Table 1. スルースバルブの損失係数

S/D	0/8	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8	8/8
f_v		97.8	17.0	5.52	2.06	0.81	0.26	0.07	0

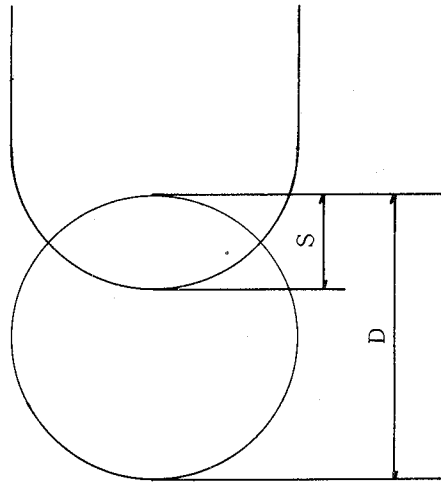


Fig. 4. スルースバルブ

初期条件

流速は0, 水頭は貯水池の水頭と同じ。

以上より解析できる。

2. 実 験

実験装置の概要を Fig 5に示す。

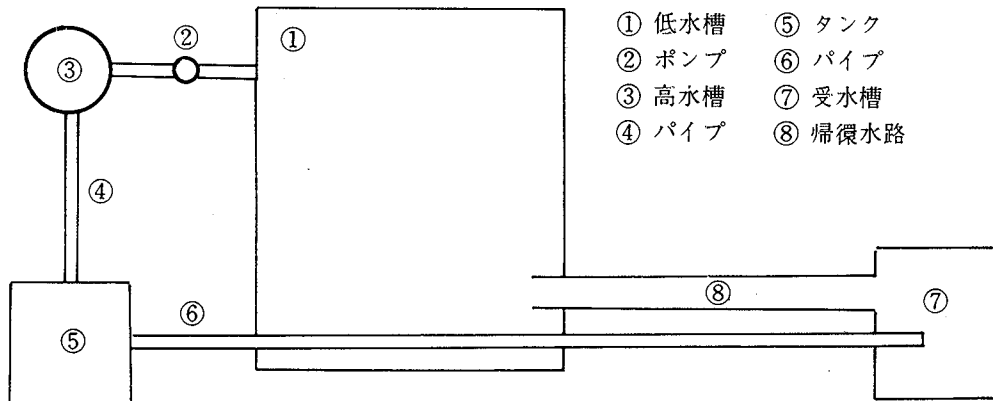


Fig. 5. 実験装置の概要

水はまず①の低水槽より②のポンプで揚水され③の高水槽に達する。高水槽から④のパイプを通して⑤のタンクに流入する。タンクは定水頭(0.79m)に保たれている。タンクより⑥のパイプ(長さ30.7m, 管径0.05m, まさつ係数はブラジウス式にほとんど従う)を通じ、⑦の受水槽に達し⑧の帰還水路を通過して低水槽に戻る。

パイプの下流端にあるスルースバルブを始め閉鎖しておく。すなわち管内の流速はあらゆる点で0である。次にバルブにハンドルをつけ等速に満開まで開放する。管内の流速は徐々に増大し、ある一定の流速に近づく。このように流速が増大する様子を Fig 6 に示すように上流側で測定した。

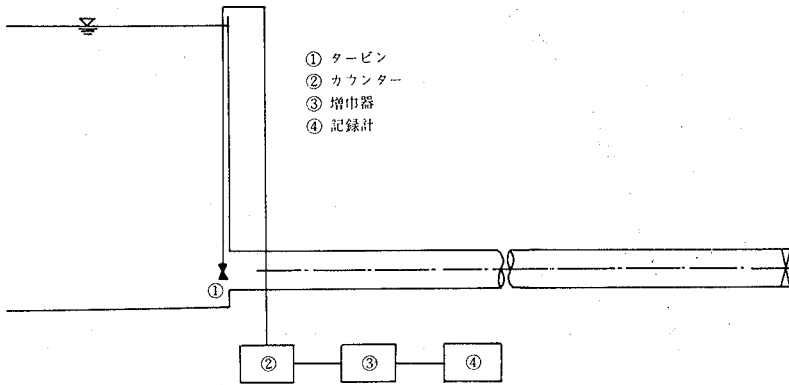


Fig. 6. 測定部分の詳細

流速の測定については変換型流速計を使った。この流速計は水流によってタービンが回転するもので記録計に接続して連続測定ができるものである。このような流速計は流れ方向が変わる測定には応答の点で問題があるが本実験の場合は流れ方向が一定で、且つ増大する方向であった。場所については下流側では測定しにくいので上流側で測定した。管の長さや圧力波の伝播速度を考えると下流側と上流側の流速の時間のおくれは無視できる。Fig 6 で流速計での位置のタービンの回転数と管内平均流速を知るために、流速をかえて、管内平均流速と回転数の関係のキャリブレーションカーブをあらかじめ作成した。Fig 7 に示す。

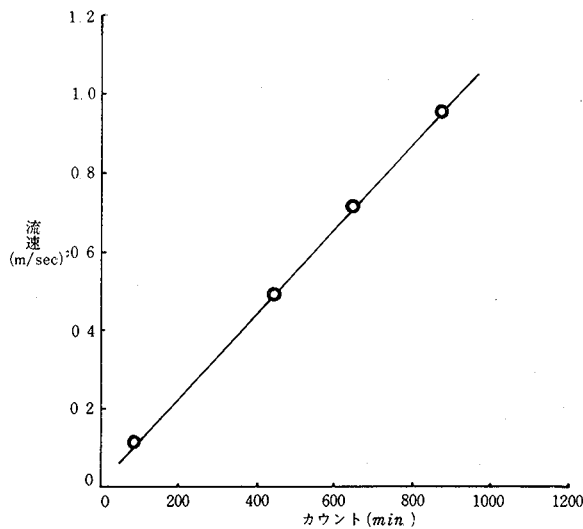


Fig. 7. 管内平均流速とカウントの関係

またタンク内の乱れがタービンの回転に影響するのでタンク内に流入する水の量を調節した。

3. 結果および考察

Fig.8に $T_0 = 2.8 \text{ sec}$ の場合の実験値および理論値の比較を示す。

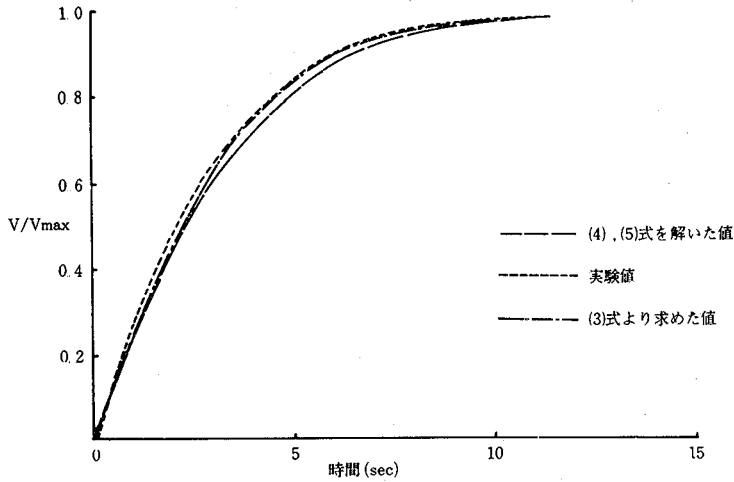


Fig. 8. 実験値と理論値の比較 ($T_0=2.8\text{sec}$)

理論では $V_{max}=1.02\text{m/sec}$ 、管及び水の弾性係数はそれぞれ $2.89 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、 $2.24 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、管厚 0.5 cm として計算した。理論値と実験値はほとんど一致しているが流速が0に近い所はややずれている。これは本流速計の原理上0に近いところが精度が悪いためである。エネルギーは主として流速を加速するのに使われ、定常状態近くになるとまさつ損失に使われる。なおこの場合 ($T_0 = 2.8 \text{ sec}$)、(3)式より求められる T と V/V_{max} の関係は基礎方程式を解く方法で得られた値と非常に近い。バルブ開放時間が比較的速かったためである。定常状態に達する時間はいずれの方法で計算しても余り差がない。 $T_0=35.4 \text{ sec}$ 、と仮定して基礎方程式を解く方法で解析した値と(3)式より近似的に求めた値との比較をFig.9に示す。

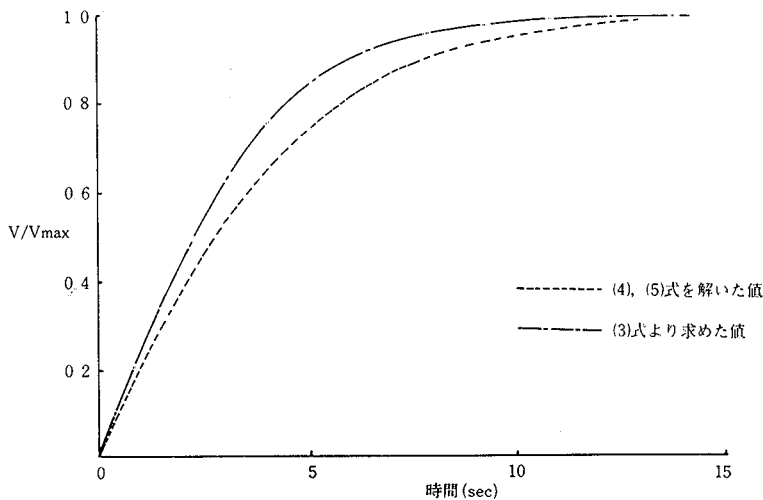


Fig. 9. 基礎方程式による解と近似解((3)式)との比較 ($T_0=35.4\text{sec}$)

このようにバルブの開放時間がおそい場合は(3)式で求めた値とはかなり差がある。バルブの開放時間が短かくて、単一パイプの場合は(3)式で解析し(この場合Fig.3を使うと便利である)、複雑なパイプや開放時間が長い場合は基礎方程式を解く方法で解析すればよい。なお圧力についてはほとんど問題にされていなかったがバルブ地点における理論的な圧力の変動($TO=2.8\text{sec}$ の場合)をFig.10に示す。バルブ開放開始とともに急激に減少する

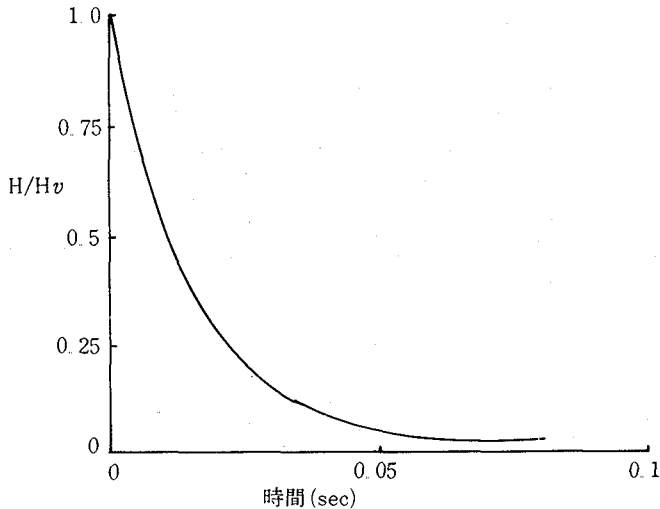


Fig. 10. バルブ地点における圧力の変動
($TO=2.8\text{sec}$)

V ま と め

流れを予測することは水の管理上重要であり、送水開始時の流れに対して、単一パイプで急開放の場合の式で求めた値、非定常流の基礎方程式を直接解いて得られた値、実験より得られた値の比較を行なった。このような送水開始時の流れの一般的な解析方法を示した。

この研究に対して御指導を賜わった、九大田辺教授に謝意を表します。計算は香川大学計算センターで行なった。職員の方々に誌上を借りて謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) Streeter, V.L.: Fluid mechanics, Mcgrew-Hill(1966).
- (2) 前出1)
- (3) Streeter, V.L.: Hand book of fluid dynamics, Mcgrew-Hill(1956).
- (4) 笠原英司, 棚橋隆彦: 水柱分離を伴う水撃作用の解析, 日本機械学会論文集, 34(No.263), 1209-1216(1965).
- (5) Streeter, V.L., and C. Lai: Waterhammer analysis including fluid friction, *Proc. A.S.C.E.*, HY3, 79-112(1962).
- (6) Streeter, V.L.: Valve stroking to control waterhammer, *Proc. A.S.C.E.*, HY2, 39-66(1963).
- (7) 土木学会: 水理公式集, 土木学会(1963).

ON THE ANALYSIS OF UNSTEADY FLOW
AT THE BEGINNING OF THE FLOW IN PIPE LINE

Souichi NISHIYAMA

Summary

The problem of predicting the water flow is of importance on the water control and the safety of hydraulic structure. In this paper, I analyzed the unsteady flow at the beginning of flow by solving the basic, partial and differential equations of the unsteady flow in pipe line.

And these studies were experimentally made and compared with theoretical results. The theoretical results agree well with experimental results.

(1974年5月31日受理)