

# 多段パイプライン・スタンドシステムの サージングに関する研究 (I)

オリフィスと自動定量分水装置の効果について

竹 山 光 一\*

---

Studies on the Surging in the Multi-Placed Pipeline-Stands  
System (I)

The Effects of Orifice and the Automatic Divergence  
Apparatus

Kouichi TAKEYAMA

---

## Synopsis

This paper studied on the hydraulic transients in the pipeline with 3 pipe stands (upper, middle and down side) system. Firstly, the amplification of the surges in the tank were compared with the relations of different hydraulic conditions, caused by the sudden opening and closing of the valve of the end of the system.

Then to prevent from the dangerous water level by the amplification of the surge, that usually caused by the air, in the pipe, which is taken by the overflow-water from the weir, all pipe stands were divided into two parts by a board with an orifice at the bottom of it.

Secondly, in the two stanks and pipe systems, some effects about the regulation of the amplification with the propagation of the surge by the orifice and automatic diversion apparatus with buoyancy were examined.

These experimental results showed that when the down sited valve was suddenly opened in a short time, the oscillations of the displacements of the water surfaces in the stands from the equilibrium (i. e. hydrostatic) positions happend and some amplifications with the propagations were observed. But under some velocity, oscillations could not be observed.

Here, the amplification ratios in the down or upper placed stand were bigger than those in the middle suited one. And the sensitivity of water height-variations showed that these had much relations with the periodical length of sine-curved input flow of time series.

And the next results showed that the coexistence of the orifice and the apparatus had very sufficient facility on the regulation of these amplification of the surge.

## I 緒 言

大規模かつ複雑な水利用システムは、貯水池、調整池、

開水路、管水路、ゲートをはじめとする様々な構造物の組合せによりなるものが多い。ここでシステムとしての水理・応答特性とくに非定常な過渡現象を含めた特性が十分に把握されないまま設計・施工されたときは、通水

\* 農林システム学講座

後に通水不能を生じたり、管理が困難になることがある。

さて水輸送システムは、よく水路線上の落差・区間距離などに対応して所要地点にパイプライン・スタンド（水槽）を取り付けることが多い。このスタンドには上部を開放して圧力調整や分水を単純かつ確実にを行うオープン型と、フロートバルブなどで下流側をバルブで閉じ、上流側は水槽に直結し大気に開放する水槽を配置して自由水面を与えて、水槽の水位に連動したバルブの開閉により管内の流れを制御するセミクローズド型と、取水口から末端まで全線にわたり閉鎖された管水路で結ばれたクローズド型に分けられる。このうちオープン型は水管理操作の上からは供給主導型と呼ばれ、微細な調整を必要とせず、農業用の幹線送水系になじみやすいタイプとされてきた。またセミクローズド型は、上下流水槽間の設定水位によって落差が厳密に調整され、水使用の有無を感じて下流から上流に向かって流況変動が伝わる特徴があり、クローズド型はどこかで給水栓や制水弁を操作した時に限り、その操作量に応じた流れが生じるため需要主導型と言われるなど、それぞれの特徴がある。

さてスタンドは導水管呑み口からのシールを確保して、安定した分水を実現するために定水位を保つようにした部分（第一次水槽）と、スタンドより下流部側へ送水する管を取り付けた部分（第二次水槽）よりなるものが多い。これらの間の通水が中壁を越流して行なわれるものときは越流型スタンドと呼ばれ、中壁下部に所定の流量を流出できる孔口（オリフィス）を設け、これによるものは孔口型スタンドと呼ばれる。とくに前者型のスタンドは目的の水位を実現しやすいため多く用いられるが、一次水槽と二次水槽の間を中壁越流させるときには、水脈に連行される気泡によって脈動流が発生すること<sup>1)2)</sup>、水位自動調節ゲートによる揺動現象なども水路系で水位変動を異常に高めることなどが指摘され、さらにここでの損失水頭やフルード数などに関する実験<sup>3)4)5)6)7)</sup>によって、スタンドの諸次元の設計条件に関する指針が検討され、数理モデルによる運用上の問題が研究されている<sup>8)</sup>。とくに水路の応答特性や周期変動型の流入量と脈動流のシステムでの伝播に伴う異常な増幅が生じることなどの報告と、空気の連行が生ぜぬようにオリフィス型中壁を用いたものは、増幅がかなり減少するなどの研究がなされている<sup>9)10)</sup>。

これまで筆者らは開水路からの分水を行うとき、開水

路側の水位変動の影響を受けにくい定量自動分水装置を開発・研究し、多支線への分岐を検討してきた<sup>11)</sup>。

今回の報告はこれまでの装置をパイプライン系へ応用することを目的とし、水位の伝播に伴う異常波高が生じにくいとされるオリフィス型の中壁を実験的に確かめつつ、まずパイプライン系で生じる基本的なサージとその伝播に伴う諸特性を実験的に検討し、併せて装置の浮子部の改良を行い、これをパイプラインシステムに用いたときに安定した送水制御の実現を目的として、まず波高の伝播に関するこの装置の効果を実験的に検討したものである。

## Ⅱ 多段連結水槽のサージングについて

### 1. オリフィス型中壁とサージの伝播の実験の概要

図1のような3段連結水槽のモデルを仮定する。オリフィス型の中壁でスタンドの一次と二次水槽を区分し、水槽をパイプで連結した。なお下流水槽より末端に円筒堰を取り付け末端部を小さな円筒堰とした。このとき以下の等の条件のもとで、各（一次）水槽で発生した波高とこの伝播について考察した。

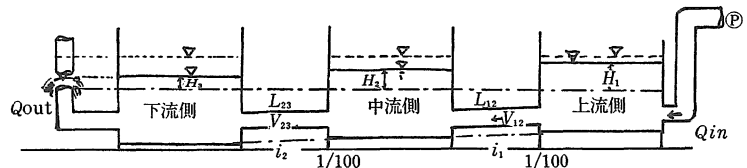


図1 オリフィス型中壁をもつ3段連結水槽の概要

- ① 静水時から一定時間下流端バルブを開放する。
- ② 上流端で急激な流入量を与える。
- ③ 一定流入量のもとで一定時間下流端バルブを閉鎖する。
- ④ 上流端で正弦波的に変化する流入量を与える。

実験時の木製水槽は幅 60 cm、長さ 110 cm で出口よ

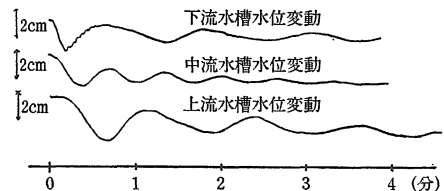


図2-1 バルブの開放時（(c)、10秒間）のサージ

り 20 cm の場所に中壁を設け、その底の中央部に幅 20 cm 高さ 12 cm のオリフィスを設けた。水槽間の距離は 8.45 m で勾配は 1/100 である。これらを直径 75 mm の塩ビ管で連結した。最下流側水槽より 2 m 下流で 90°

のエルボを置き、高さ 20 cm (A タイプ)、10 cm (B)、40cm (C)、31 cm (D) などでもって堰上げ高さが変化できるようにした。

2. 実験結果の概要

(1) 静水時から一定時間下流端バルブを開放したときエルボに(B)をつけこれに(C)または(D)を乗せる。静水状態より一定時間(C)または(D)を取り、その後復歸させてみ

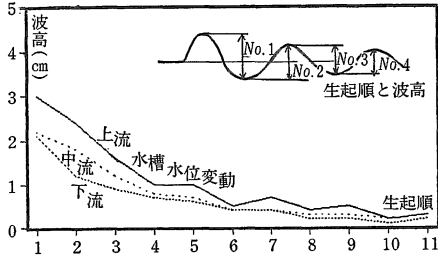


図2-2 バルブの開放時のサージの減衰

た。この円筒部と下流側水槽の間の短い周期のものと水槽間のサージングが見られた。生起順に波頂～波底の高さを見ると上流水槽側での変動が大きいことが見られた。この一例が図2である。なおこのとき上流と下流の水槽ではこれらの諸次元を(5)に代入して得られる72～84秒の周期が見られた。中流に位置する水槽の水位では約40秒の周期変動が見られた。

(2) 上流端で急激な流入量を与えたとき

上流側水槽に図3.1のようなハイドログラフの流量変化を与えた。このとき水位の変動は上流側、次に下流側の順に変動が小さくなり、中流に位置する水槽での変動は極めて微小となった。

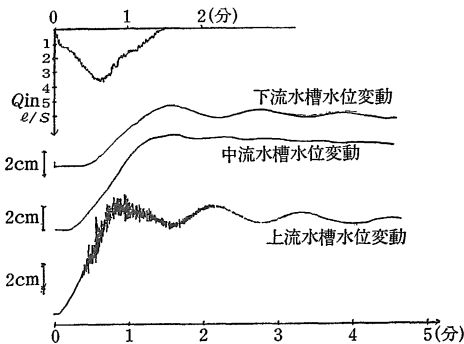


図3 上流端で急激な流入量を与えたときの波高

(3) 一定流入量のもとで下流端バルブを一定時間閉鎖したとき

1.5 l/s の一定流量が末端部でエルボを円筒堰として流れているとき、これを10、30秒間閉じたときの波高は図4の様に得られ、周期的変動は見られなかった。このときは遡上に伴い波高がやや減衰する現象が見られた。

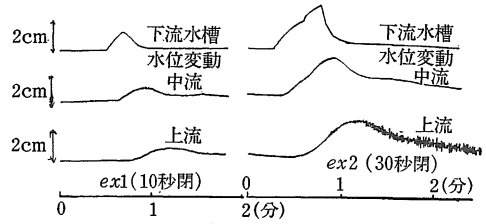


図4 一定流入量のもとで下流端バルブを閉鎖したときのサージ

(4) 流入量が正弦波的に変化するとき

図1の配置では計算された周期に近いもの即ち末端と下流側水槽の間で約2.6秒、上・下流水槽で約74秒という振動が見られたので、ここで正弦波状流入量を(A)中心流量 3.0 l/s、振動 2.0 l/s、(B)中心流量 1.5 l/s、振幅 0.5 l/s を上述の周期の近辺の値の周期で与えてみた。

水槽の位置が下流のものほど波高は低くなった。

また流入量の周期と上・中・下流部の水槽の変動との関連はそれぞれ図5-1～3である。これによると周期が長くなるほど波高が長くなるが見られた。流量があるときは水路固有の周期の影響はここでは確かめられなかった。

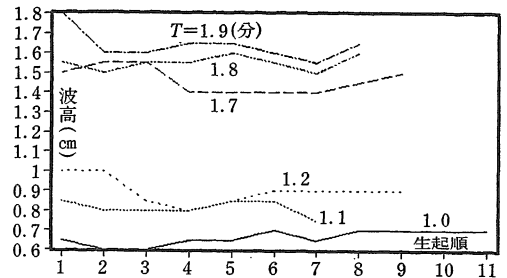


図5-1 流入量の周期の違いによる上流側水槽での波高とその生起順

3. サージングシステムのシミュレーション

1. 数理モデル

これらの現象は水理学的には2水槽(添字  $j, k$ ) の間におけるサージングと見なし、水面積を  $A$ 、水位を  $H$ 、流入量を  $I$ 、流出量  $O$  として以下の式が成り立つ。 $V$ は水槽を結ぶ管(断面積  $a$ 、長さ  $L$ )内の流速で、サージングの周期  $T$  は(4)となる。

$$A_k \frac{dH_k}{dt} = I_k - O_k(1), \quad A_j \frac{dH_j}{dt} = I_j - O_j \quad (2)$$

$$\frac{dV_{jk}}{dt} = a_{jk} \frac{H_j - H_k - C \cdot |V_{jk}| \cdot V_{jk}}{L_{jk}/g} \quad (3)$$

$$T = \sqrt{\frac{L_{jk} \cdot A_j \cdot A_k}{g \cdot a_{jk} \cdot (A_j + A_k)}} \quad (4)$$

最上流端では周期  $T$  の正弦波状の流入量を  $Q_{in}$  とし時間  $t$  で微分して(5)を得る。水路末端では  $Q_{out}$  とし、幅を  $HABA$  で表わした円筒堰と見なして Francis 公式より(6)で表わす。

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = A \cdot \cos\left(t \frac{2\pi}{T}\right) \cdot \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

$$\frac{dQ_{out}}{d_i} = 1.84 \cdot 1.5 \cdot HABA \cdot H^{1/2} \quad (6)$$

ただし、 $HABA = \pi \times D$ 、 $D$ ：末端部円筒堰の径 (m)

$$C = 1 + f_i + \frac{124.5 \cdot n^2}{L_{jk}/g} - \frac{L_{jk}}{D_{jk}^{1/3}} / (2g) \quad (7)$$

$f_i$ ：流入損失係数、 $n$ ：粗度係数、 $D_{jk}$ ：管径 (m)、 $g$ ：重力加速度

このように各水槽でのサージング系を連立常微分方程式系で表わし、初期条件と境界条件を与えて解くことができる。

2. 3連水槽のシミュレーションの結果とまとめ

ルンゲ・クッタ法によってシミュレーションを行った。

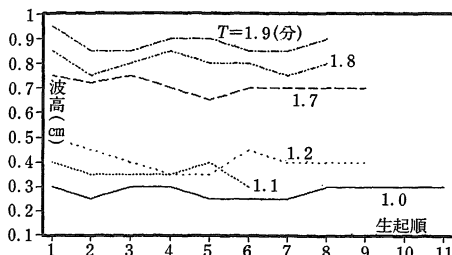


図5-2 流入量の周期の違いによる中流側水槽での波高とその生起順

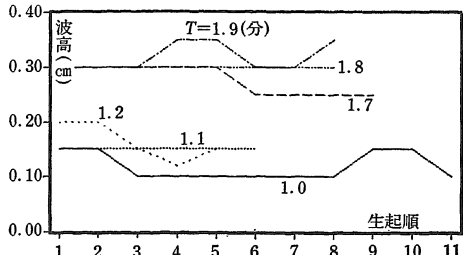


図5-3 流入量の周期の違いによる下流側水槽での波高とその生起順

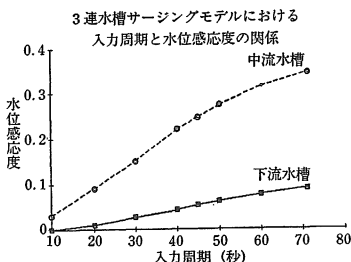


図6 周期と水位感応度

3水槽面積をともに  $1 \text{ m}^2$ 、水槽間のパイプの径を  $10 \text{ cm}$ 、長さを  $5 \text{ m}$ 、末端部円筒堰の管径  $12.5 \text{ cm}$ 、末端部円筒堰までのパイプの長さを  $70 \text{ cm}$  とし、水槽間の固有周期を計算すると、 $35.8 \text{ 秒}$ となる。そこで入力する正弦波の中心流量を  $5.0 \text{ l/s}$  振幅を  $3.0 \text{ l/s}$  とし、 $35.8 \text{ 秒}$  周辺の値を入力し、 $0 \text{ 秒}$  から  $600 \text{ 秒}$  までの計算を行い、周期と上流側水槽の水位変化に対する中流・下流水槽の比率（水位感応度）をまとめると図6が得られ、入力流量時系列の周期が大きいほどこの比率が大きくなることが予測される。

このようにオリフィス型の中壁をもつ複数個のオープンスタンドをパイプで連結し、その上・下流端での水理条件を急激に変化させたときのサージの伝播に関する特性を調べた結果、中壁越流型と比して、空気の連行による脈動はほとんど見られないこと、とくに静水状態と流量が存在するときとは援動の持続性並びに水槽の位置による伝播の特性が大きく異なること、また流入量の周期が長くなるに伴い、3水槽の水位変動の幅が拡大するなどの実験結果を得た。またこれに関する数値計算によって、流入量の周期が長くなるに伴い、上流側の水槽の水位変化に対する中流や下流側の水槽の水位変化の割合（水位感応度）が増大することが示された。

III 浮力を用いた開水路自動分水装置と浮子の改良

1. 装置の概要と流量制御特性

開水路からパイプを経てこの装置が設置された分水槽に通水するとき、分水槽の堰頂を基準にして、開水路の水位と堰の越流水深  $h$  との定常時の落差  $H$  は、重力の加速度を  $g$ 、水の密度を  $\rho$ 、ここでの流速を  $V$ 、流量を  $Q$ 、管径を  $D_2$  とし、長さ  $L$  での分水パイプの形状損失と摩擦損失係数の和  $\Sigma f$  を速度水頭を  $V^2/2g$  に乗じて得られる。さらに出口の制御板では、出口の分水パイプと制御板との間隔を  $a$  としたとき、通水断面積が  $A_3 = \pi D_2^2/4$  から  $A_4 = a\pi D_2$  になったときの断面積の縮小変化に伴う損失係数  $f_c$  を急縮損失とみなして、Weisbach の式(8)を用いて評価した。断面積の変化が拡大するときは、急拡とみなして Borda の(9)式を用いて評価した。

$$\zeta_{sc} = (1/C - 1)^2, \quad C = 0.15(A_3/A_4) + 0.59 \quad (8)$$

$$\zeta_{sw} = (1 - A_3/A_4)^2 \quad (9)$$

分水パイプの全体の損失係数の総和  $\Sigma f$  のなかで、出口部での損失水頭を  $\Delta H$ 、圧力の降下を  $\Delta p$  とし、Bernoulli の定理を用いて(10)とする。静水状態から水が流れて浮子の喫水が増大したとき、この体積を計測し浮

子にかかる浮力を求めこれを  $T$  とすると、これに相当するものとして、板への運動量  $F = \rho Qv$  または出口部分での動水圧の変化に断面積を考慮した  $P$  を(10)を用いて圧力の降下を考え、 $P = \Delta p A_3$  とした。

$$\Delta H = (1 + fb + f_{sc}) (A_3/A_4)^2 V^2 / 2g = \Delta p / \rho g \quad (10)$$

2. 実験結果

今回の実験は、まず図7の様な幅 59 cm, 横 106 cm, 堰までの高さ 56.8 cm の水槽に、切り欠き幅 21 cm の刃形四角堰を水槽底から 57 cm の位置に設け、内径 10

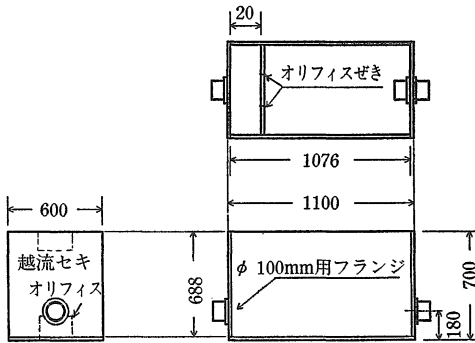


図7 分水槽の概要

cm の塩ビパイプの出口での微小開度による規制効果を調べ、表1～2の結果を得た。とくに今回は出口での微小開度による規制効果が、即ち流量規制部で越流水深の増加に対し浮子の体積が大きく増大するように配慮し、浮子は図8のように半径 14 cm の発砲スチロールの球を用い、この中心部で対応するように通水時の制御板への力  $F$  を計測し、同時に開度  $a$  を調べた。流れがないときの  $x_1$  から流れ規制時の  $x_2$  までに制御板にかかる力  $T$

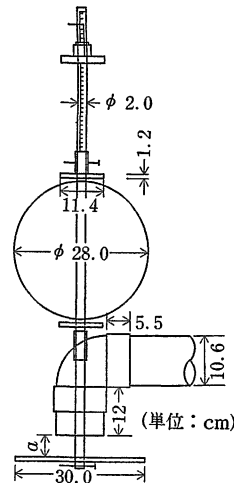


図8 球型発砲スチロール浮子部

表1 水位変動の範囲と水位感応度 ( $\Delta h/\Delta H$ )

No.	1	2
max $H$	131.3	125.1
min $H$	111.0	123.1
max $h$	4.1	3.65
min $h$	3.7	3.60
$\Delta h/\Delta H$	0.02	0.003
input $Q$ (l/s)	4.0	3.7

(単位 cm, s, l/s)

表2 浮子にかかる力 (越流セキ幅14.0cm)

No.	h	Q	T	P	F
1	8.2	12	19.5	11.8	18.9
2	4.1	4.0	6.8	5.56	2.1
3	3.6	3.7	6.8	6.5	1.8

(単位cm, s, l/s, kg)

は浮子より(11)と概算し表2の結果を得た。

$$\rho g V = \int_{x_2}^{x_1} \rho g r r^2 (1 - x^2/r^2) dx \quad (11)$$

IVパイプラインシステムへの適用とサージングの比較上の分水装置を取り付けできる水槽を 10.4 m の距離で2個配置しこれを管径 10 cm のパイプで結び (勾配 0) この上流側からの流入は(A)2つの水槽の最高水位よりも

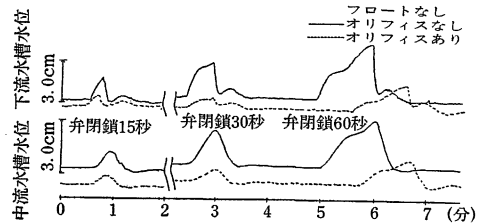


図9-1 一次水槽における水位変動例その1 (浮子なし, オリフィス隔壁なし)

最大約 130 cm の落差を生み出せる高水槽から比較的大きな流入量を生じるもので、広い水位変動範囲の対応を検討するものと、(B)近接した上流側水槽から流入するもので小流量時で対応する落差が約 30 cm までの2つの流入系統を設けた。下流側へのパイプと連結するときは

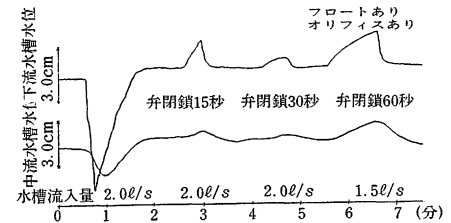


図9-2 一次水槽における水位変動例その2 (浮子, オリフィス隔壁あり)

堰の切り欠き部を板で被った。最下側水槽の出口より約 2 m の所で90°エルボを付け、さらにこれに適当な (長さ: 0~30 cm, 管径: 12.5 cm) のパイプを付け足して末端部とし、これによって適宜水位を維持し、管路入口のかぶり (シール) の水深を与えた。

過渡現象としては、この円筒状の堰からの流出を直径 30 cm の板 (弁) で急閉した。実験の初期条件としては一定流入量のもとで一定時間後水面が安定したとき、この弁を急閉させ一定時間後 (10~15秒, 30秒, 60秒) 急閉させたときの波高ならびにこの影響の伝播を調べた。なお浮子を設置した一次水槽部と下流側送水管取り付けのための二次水槽との隔壁は、図7の水槽の出口側から25 cm 内側で中央真下にオリフィスを設け

た。

オリフィスのついた隔壁も浮子による規制もないとき、隔壁だけが設置されているとき、これに浮子が増加するときの変動の概要の一例が図9-1, 2である。流入流量が増加するにつれ、出口を閉じる時間が長くなるにつれ波が高くなること、下流側では約20秒程遅れて小さ

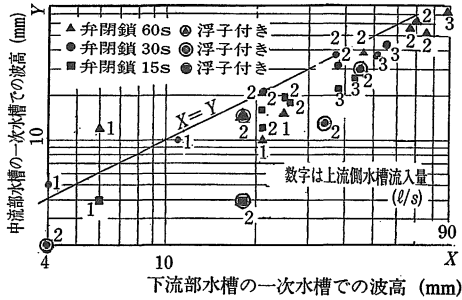


図10 各水槽で発生する波高

な二次波が見られた。隔壁があるときは、一次水槽での波高は両者ともかなり低くなっている。フロードとオリフィスが併置されているときは一次水槽での波はかなり減衰している。これは図10を見ると明らかである。また波動の周期は計算では下流側水槽と末端円筒では約2秒、両水槽間では40秒となったが、流入量、定常時の水位が変化しても下流側の一次水槽で生じる二次波までの時間はほぼ一定と推察された。以上より分水装置の機能が十分なものであること、そしてこれをパイプラインシステムに適用することはサージングの安定化に効果があると考える。

## V 結 言

オリフィス型の中壁をもつ複数のオープンスタンドをパイプで連結し、系の上・下流端での水理条件を変化させたときのサージの伝播・減衰・増幅の特性を実験的に調べた。とくに静水状態と流量が存在するときとは、振動の持続性並びに水槽の位置による減衰・増幅の特性が大きく異なること、また流入量の周期を長くすると水位変動の幅との対応である水位の感応度を調べた。さらに浮子を用いた自動定量分水装置を改良し、上流側取入れ水路の水位変動に影響されにくい効果 を 確 か め

た。これをパイプラインシステムのスタンド部の一次水槽部に設置し、潜りオリフィスの隔壁を通して二次水槽部パイプへと通水するものを複数個パイプでつなぎ、末端水槽出口のパイプの弁を急閉したとき、波動の影響が隔壁並びに浮子により大きく規制されることを確かめた。

なお本研究の一部は科学研究費補助金（一般研究(C)）によって行った。また研究を進めるに際し、島根大学農業工学科専攻生瀨崎邦博、名和秀哲、藤原義和君等の協力を得た。記して深甚の謝意を表する。なお本研究の一部は試験研究（B：01860029）代表京都大学島井清司により行なった。

## 参考文献

- 1) 田中雅史：オープンタイプパイプラインスタンドの水位変動現象：農士年講，1983，p. 16-17.
- 2) 田中雅史：オープンタイプパイプラインスタンドの水位変動現象：農士年講，1983，p. 16-17.
- 3) 田中雅史：水路系の脈動流について，農士京都支部講演要旨，1989，p. 88-90.
- 4) 松下玄他：パイプライン越流スタンドの空気連行特性について：農士年講，1982，p. 29-30.
- 5) 松下玄他：オープンタイプパイプラインスタンドの損失水頭：農士年講，1983，p. 18-19.
- 6) 山本徳司：オープンタイプパイプライン系のスタンド容量に関する実験的検討（Ⅱ），農士学会年講，1983，p. 14-15.
- 7) 山本光男：パイプライン分水スタンドの水理構造について，農士年講，1983，p. 12-13.
- 8) 例えば吉野秀雄他：オープンタイプパイプライン系のサージング解析のための汎用数理モデルの開発：農士年講，1983，p. 20-21.
- 9) 田中雅史：越流型オープンタイプパイプラインシステムのサージング特性：農士学会年講，1986，p. 44-45.
- 10) 田中雅史：水路系に発生する脈動流現象：農士年講集，1990，p. 506-507.
- 11) 竹山光一他：浮子を利用した定量分水施設の水理シミュレーション，農士論集，1987，p. 71-79.