

調整池によるオープンタイプパイプラインの 脈動防止効果の事例研究

田中良和*・向井章恵*・樽屋啓之*

目 次

I 緒 言	189	2 調整池の脈動防止効果	195
II 事例地区の概要	190	3 脈動防止に必要な水面積	199
III 脈動現象の実態	193	VI 結 言	200
IV 周波数応答法	194	参考文献	200
V 結果と考察	195	Summary	201
1 連続した多段のスタンドにおける脈動特性	195		

I 緒 言

オープンタイプパイプラインでは、水路の構造と流量の条件によって、通常の水管理においても脈動現象が生じる場合がある。脈動現象は、調圧スタンド内水位や管路内水圧を不安定化して分水効率を低下させたり、スタンドから溢水による周辺環境への二次被害の問題を引き起こす。この脈動現象の原因は、松下（1984, 1990, 1991）によれば、主に上流側の流量変動と下流側の振幅増大現象の2つの要因の組み合わせが原因である。前者はスタンドの下流側水槽の吞口における空気連行に伴う流量変動や管理者の分水口ゲート操作に伴う流量変動が挙げられる。後者は、多段に調圧分水スタンド（以下、スタンドまたはSTとする。）を連結した水路構造の水利施設が有する流量変動の固有振動特性である。

オープンタイプパイプラインの設計における脈動現象の解析手法として、水理実験や非定常数理シミュレーションが行われてきた（吉野，1984）。しかし、これらの手法は初期・境界条件を設定したモデルにおいて水理現象の時系列変化を忠実に再現するものであり、オープンタイプパイプラインシステムに求められるシステムとしての要求性能を分かりやすい指標によって明らかにする手法ではなかった。近年は、計算機の発達に伴って非定常水理解析が一般的に利用されているが、古くは、Edward et al.（1852）がオープンタイプパイプラインシステムの周波数応答からサージング特性を解明

する手法を提案していた。施設更新のための性能設計手法という観点から見つめ直した場合、この周波数応答法は、スタンドを要素、一対のスタンド間の流入と流出を入力と応答として、入力と応答の比を要素の伝達関数の大きさ（以下、ゲインと呼ぶ）を解析し、スタンド間の脈動現象が減衰するのか増幅するのかを示してシステム全体のサージング現象に関する要求性能の指標を明らかにすることができる手法であると言える。この手法のもう一つの利点は、非定常数理シミュレーションに必要とされる数値計算の労力と知識を必要とせず、水路構造の変更が伝達関数に直接反映されるためにスタンドの水深の増幅について瞬時に結果が得られることである。今後の水利施設の整備は、機能の保全や改善を行うために維持や更新を行うことが期待されているために、設計手法においても維持や更新を目的とした設計手法が必要とされている（中ら，2003）。周波数応答法は、システム内の水路施設の諸元や配置・接続の変更によって生じる各水路施設の水位の変化をシステム全体の応答として瞬時に知ることができるため、オープンタイプパイプラインシステムの今後の設計手法として期待できる。

関谷（1988）は、周波数応答法をオープンタイプパイプラインシステムの脈動現象を防止するための施設改良の検討に適用した。関谷によれば、脈動現象を防止する方法の一つとして、スタンドの二次水槽の水面積を広くすることが、一次水槽の水面積を広くすることよりも、ゲインを小さくする効果が高いことが示された。ただし、水面積の広さには調整池規模のものが必要であるとされた。本来、中間調整池の主な役割は、水路システム内における農業用水の需給の変化に対して弾力的な送水を行うためである。設計基準「水路工」の技術書（農林水産省 農村振興局，2001）においても、多目的調整池に脈

* 施設資源部水路工水理研究室

平成21年11月4日受理

キーワード：オープンタイプパイプライン、脈動現象、調整池、周波数応答法、高速フーリエ変換、ラプラス変換

動防止効果があることは明記されていない。しかし、オープンタイプパイプラインの水路システムに限り、多目的な機能の一つとして脈動現象の防止効果が期待できる。

そこで、本稿では、ある事例地区を対象にして周波数応答法による解析を行い、脈動現象について現地調査との比較による本手法の結果の妥当性を検証した。さらに、脈動現象を防止するために必要な中間調整池の水面積を算出し、周波数応答法によるオープンタイプパイプラインシステムの設計における有効性を検討した。

また、周波数応答法によって算出された調整池の水面積が十分な広さを確保したとしても、ある条件では脈動防止の効果を発現しない現象が起こることが現地観測と解析結果から同じように認められたので、脈動現象対策の注意点として報告する。

II 事例地区の概要

本地区は、S県のK平野南東部に位置し、T市ほか3町にまたがる県下有数の大規模穀倉地帯にある。

対象水路は、S地区の国営造成施設の左岸側水路に位置する幹線から分岐した水路である。

A幹線の水路構造は、上流側は開水路、下流側はオープンタイプパイプラインとした複合幹線水路である。A幹線のオープンタイプパイプライン区間には、用水の需要と供給の差を調整するために、二期事業において中間調整池が設置された。A幹線の下流端のNo.13STにて、県営のB支線とC支線へ分岐している。B支線とC支線は共にオープンタイプパイプラインである。A幹線、B支線およびC支線のオープンタイプパイプライン区間の水路系統図をFig.1に図示する。

A幹線、B支線およびC支線の水利縦断面図をFig.2～Fig.4に図示する。A幹線の上流側にある複数のスタンドにおいて、呑口のシール高が確保されていない。例えば、普通期最大送水時においても、A幹線の上流側であるNo.1～No.3の3箇所のスタンドのシール高が不足す

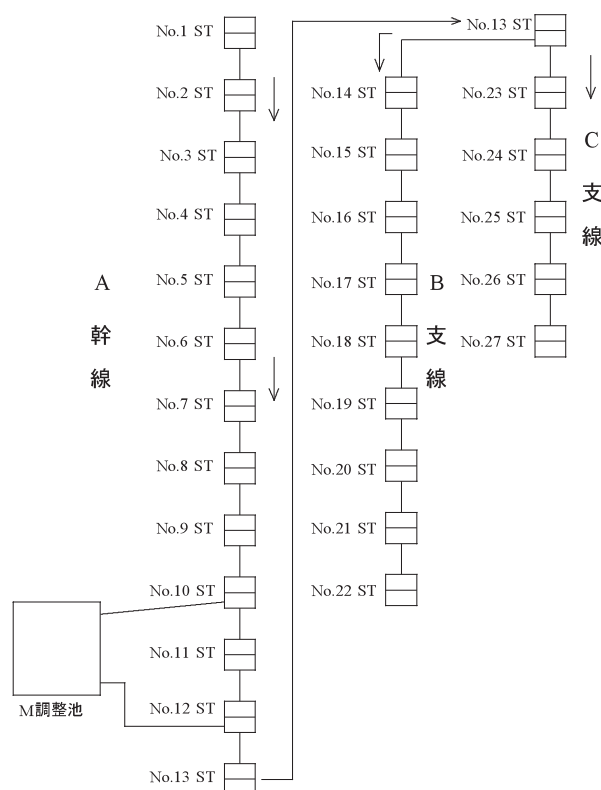


Fig.1 A幹線、B支線およびC支線の水路系統図
Water channel system diagram of A trunk line,
B branch line and C branch line

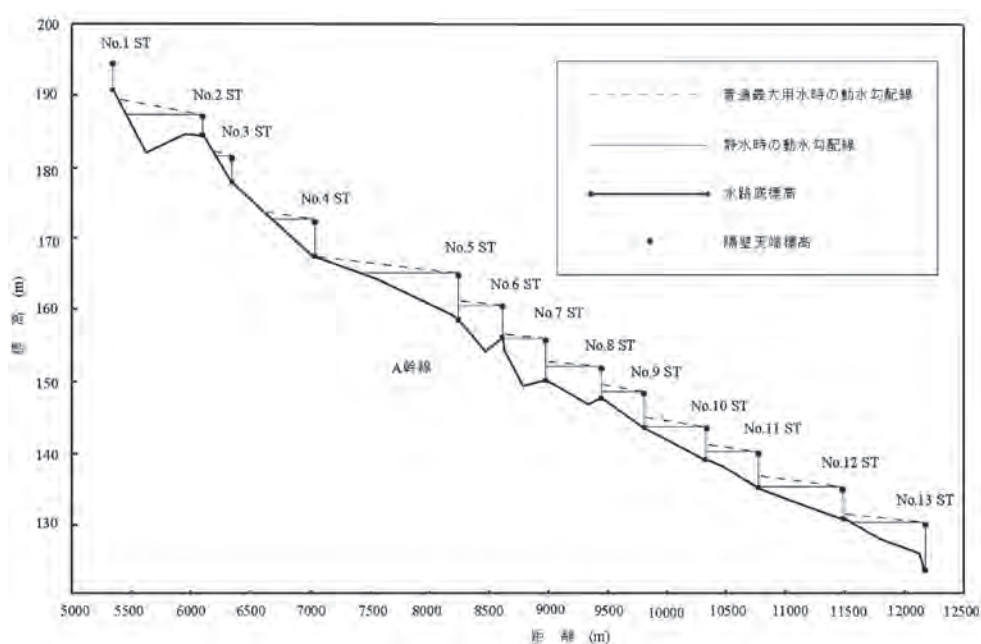


Fig.2 A幹線の水利縦断面図
Hydrology longitudinal figure of A trunk line

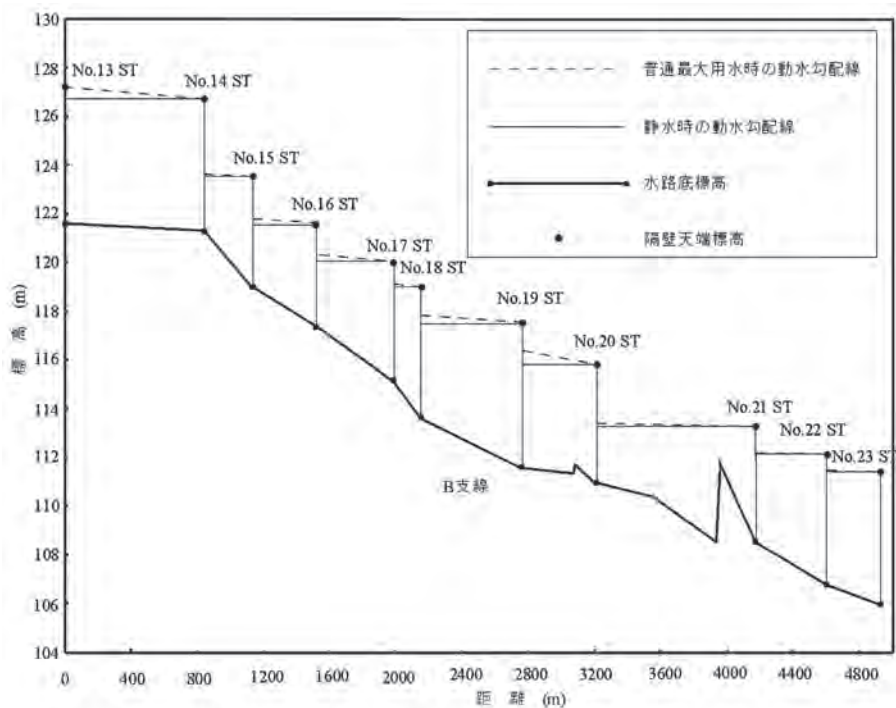


Fig.3 B支線の水利縦断面図
Hydrology longitudinal figure of B branch line

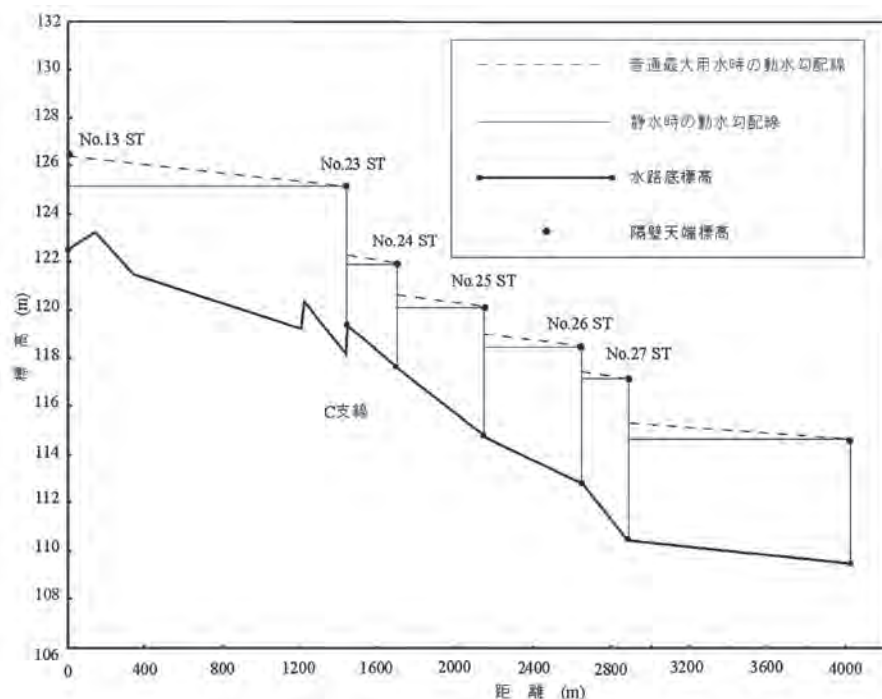


Fig.4 C支線の水利縦断面図
Hydrology longitudinal figure of C branch line

る。他方、B支線とC支線はシール高が確保されている。

施設構造および通水量は **Table 1** のとおりである。本稿において解析に用いた流量は、平常時の最大流量を選定し、平成8年の7月6半旬における通水量とした。

A幹線の下流側と支線の全域におけるスタンドでは、脈動防止の対策工法が施されている。**Fig.5** に示すよう

に、A幹線の下流側のスタンドでは、通気孔（エアスティッキ）、越流ナップを導流壁で抑えた隔壁、および多孔式整流板（穴あき整流板）の3点が施されていた。他方、支線の全てのスタンドは通気孔（エアスティッキ）、越流ナップを導流壁で抑えた隔壁の2点が施されていた。

Table 1 施設構造と流量の諸元
The dimension of facilities structure and flow rate

A 幹線														
スタンド名		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13
一次水槽	長さ	3.3	3.275	3.275	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	幅	2	2	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.25
	高さ	5.9	4.16	5.46	6.5	7	7.4	7.3	5.95	7.3	5.95	7.55	7.25	8
	底敷高	190.6	183.6	176.8	166.35	158.273	154.067	149.194	146.7	141.743	138.139	132.993	128.627	122.35
	接続管頂高	191.2	185	178.25	167.903	159.55	156.695	150.04	147.969	144	139.443	135.493	130.57	124.05
	通水量	1.931	1.832	1.745	1.661	1.516	1.516	1.516	1.516	1.479	1.422	1.422	1.333	1.476
	分水量	0.068	0.087	0.084	0.112	0.000	0.000	0.000	0.037	0.057	0.000	0.050	0.024	0.177
隔壁	幅	2	3.275	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2.5	4
	高さ	4.85	2.9	4.5	5.55	5.95	5.784	6.046	4.699	6.086	4.724	6.344	4.302	7.3
二次水槽	長さ	3.3	3.275	3.275	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	幅	2	2	2	2.3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.25
	高さ	5.9	4.16	5.46	6.8	7	7.4	7.3	5.95	7.3	5.95	7.55	7.25	8
	底敷高	190.6	183.6	177.7	166.35	158.273	154.067	149.194	146.7	141.743	138.139	132.993	128.627	122.35
	接続管頂高	191.2	185	176.8	167.903	159.55	155.367	150.579	147.862	142.943	0.664482	134.193	130.57	124.05
	通水量	1.863	1.745	1.661	1.549	1.516	1.516	1.516	1.479	1.422	1.422	1.372	1.550	1.299
	分水量	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

B 支線										
スタンド名		No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22
一次水槽	長さ	4.53	2.52	2.53	2.5	2.5	2	2	2	1.35
	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.75	2	1.5	1.5	5
	高さ	6.924	6.487	5.583	6.25	6.9	7.34	5.9	6.4	7.35
	底敷高	120.9	118.1	116.917	114.2	113.2	111.06	110.5	107.96	105.4
	接続管頂高	122.1	119.8	118.034	115.3	114.3	112.16	111.5	108.96	106.3
	通水量	0.794	0.635	0.626	0.618	0.592	0.554	0.488	0.403	0.251
	分水量	0.000	0.009	0.008	0.026	0.038	0.066	0.053	0.152	0.050
隔壁	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.5	2	1.5	2	5
	高さ	5.608	5.187	4.406	4.85	5.5	5.94	4.5	5	5.8
二次水槽	長さ	2.03	2.52	2.52	2.5	2.5	2.5	2	2.5	2.1
	幅	2.01	2.52	2.51	2.5	2.75	2	1.5	1.5	5
	高さ	6.924	6.487	5.583	6.25	6.9	7.34	5.9	6.4	7.35
	底敷高	120.9	118.1	116.917	114.2	113.2	111.06	110.05	107.96	105.4
	接続管頂高	122.1	119.3	118.031	115.3	114.3	112.06	111.5	108.96	106.3
	通水量	0.794	0.626	0.618	0.592	0.554	0.488	0.435	0.251	0.201
	分水量	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

C 支線						
スタンド名		No.23	No.24	No.25	No.26	No.27
一次水槽	長さ	2.54	2.5	2.5	2.5	2
	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	8.303	5.572	6.689	6.76	8.36
	底敷高	117.504	117.37	114.505	112.357	110.058
	接続管頂高	118.884	118.434	115.47	113.457	111.158
	通水量	0.505	0.505	0.505	0.437	0.431
	分水量	0.000	0.000	0.068	0.006	0.000
隔壁	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	7.008	4.272	5.389	5.702	7.156
二次水槽	長さ	1.99	2	2	2.02	4
	幅	2	2	2	2	2.5
	高さ	8.303	5.572	6.689	6.76	8.36
	底敷高	117.504	117.37	114.505	112.357	110.058
	接続管頂高	120.329	118.434	115.47	113.457	111.158
	通水量	0.505	0.505	0.437	0.431	0.431
	分水量	0.000	0.000	0.000	0.000	0.297

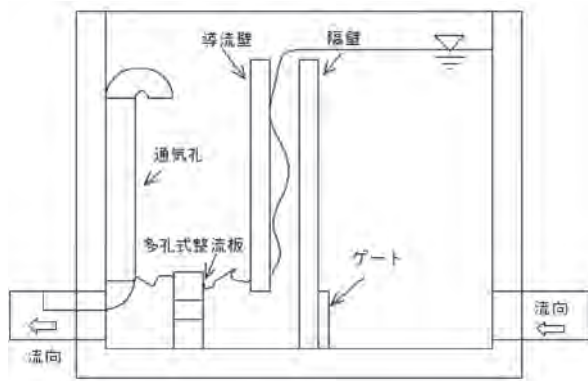


Fig.5 スタンドの構造
The structure of the stand

Ⅲ 脈動現象の実態

平成 17 年に K 局 S 事業所によって、A 幹線と B・C 支線の脈動現象について現地観測が行われた。本章は、その結果を要約し、高速フーリエ変換を行い脈動現象の周期を調べたものである。著者らは平成 20 年 9 月 10 日に A 幹線の流量を調整して A 幹線と B・C 支線において同様の脈動現象が生じることを確認した。

現地観測の試験方法は、上流側の流量を操作して、No.3ST における流量を $0.6\text{m}^3/\text{s}$ から $1.0\text{m}^3/\text{s}$ に変更した際に、スタンドの水位を測定するものであった。水位の測定方法は、圧力式水位計（精度 $\pm 20\text{mm}$ ）を各スタンドに設置し、10 秒間隔で計測した。

その結果、No.10ST から M 調整池を経由して下流側へ送水する場合と M 調整池を経由しない場合では、脈動現象の発生に大きな違いが見られた。例えば、M 調

整池を経由した場合、No.3ST における流量が $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 以下では、脈動現象は生じなかった。No.3ST における流量が $1.0\text{m}^3/\text{s}$ の時は、M 調整池の上流側のみ脈動現象が生じたが、M 調整池よりも下流側では脈動現象が生じなかった。ただし、M 調整池を経由するが、No.12ST で少量の越流がある場合、越流量が少量であっても、下流側において脈動現象が生じた。

他方、M 調整池を経由しない場合、No.3ST における流量が $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 以下では、脈動現象は生じなかったが、流量が $1.0\text{m}^3/\text{s}$ に増加すると、M 調整池の下流側において、A 幹線と B・C 支線に脈動現象が発生した。下流側の支線において水位変化が大きく、二次水槽の水位が隔壁の天端高を越えて、スタンドから溢水しかねない状況となった。

M 調整池を経由しない場合について、A 幹線、B 支線および C 支線のスタンドの二次水槽の水位の時系列変化 (Fig.6) を、高速フーリエ変換することによって代表的な固有周期があるかどうかを調べた。

その結果、Table 2 に示すように、No.3ST の二次水槽では、低周波数から高周波数までを含んだ不規則な振動であった。No.9ST の二次水槽では、89 秒の周期の短い脈動現象が生じた。続く No.12ST の二次水槽では、脈動現象の周期が 120 秒に伸び、続く B 支線と C 支線の各スタンドの二次水槽では、脈動現象の周期がさらに長くなり、158 秒になった。下流側ほど周期が若干大きな原因は、各スタンド間の管路延長は、約 500m 間隔であったが、地形の高低差によって約 1km の間隔が生じた区間もあるためであると考えられる。

地区の概要と脈動の実態から判断して、脈動現象の発生する原因は、No.1ST から No.7ST の間のスタンドに

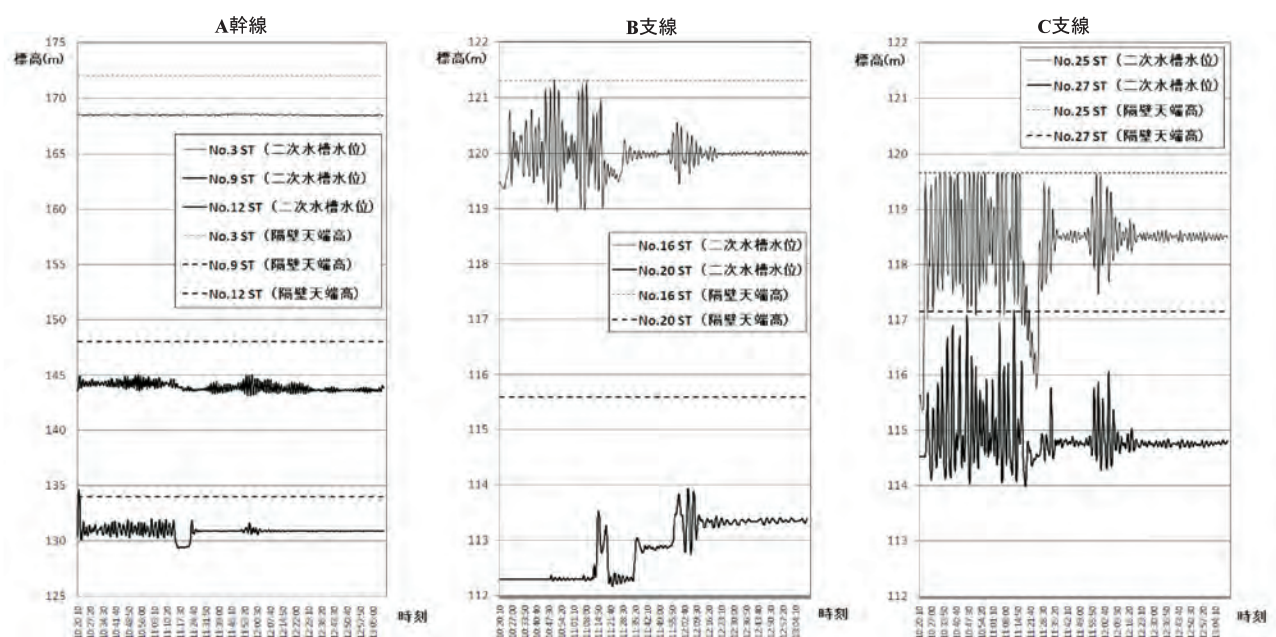


Fig.6 脈動現象における水位の時系列変化
Time series change of the water-level in the surging phenomenon

Table 2 現地観測した脈動現象の周波数特性
Frequency characteristics of observed surging phenomenon

観測日時	平成 17 年 8 月 26 日		代表的な 周期 (S)
	10 時 20 分 10 秒～ 13 時 10 分 40 秒		
ポイント数	1024 個		
観測時間間隔	10 秒間		
観測点	A 幹線	No. 3 ST	200
		No. 9 ST	89
		No. 12 ST	120
	B 支線	No. 16 ST	158
		No. 20 ST	205
	C 支線	No. 25 ST	158
		No. 27 ST	158

おける呑口のシール高が不足する水路構造であることから、脈動現象の始まりは、シール高不足に起因して管内に連行した空気がブローバック現象を起こして流量の微小変動を引き起こしたことによると推察した。また、代表的な固有周期があり、各スタンド間において概ね一致していることから、上流側スタンドにおいて開始した水面の震動が、M 調整池を経由しなかった場合では、幹線の下流側や支線のスタンドにおいて増幅したと推察した。

IV 周波数応答法

周波数応答法は、オープンタイプパイプラインの運動方程式をラプラス変換して、その伝達関数を求め、入力信号として流量変動を与えた場合に、伝達関数を通して流量変動がどのように変化するかを検討を行うことを目的とする。

Edward et al. (1852) による導出方法に従い、既設のスタンドと管路による水路構造と通水量を入力して伝達関数を求めた。オープンタイプパイプラインの水路システムは、Fig.7 に示すような上流側スタンドの二次水槽と下流側スタンドの一次水槽が U 字管の水路構造を形成した要素が連結して構成されている。この U 字管水路に流れる流体が剛体であると仮定すると、流れの状態方程式は次式になる。

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_1 - q_2}{P_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{g}{L} \left(h_1 - h_2 - f \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{q_2 - q_3}{P_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$q_2 = v_2 A \quad \dots\dots\dots (4)$$

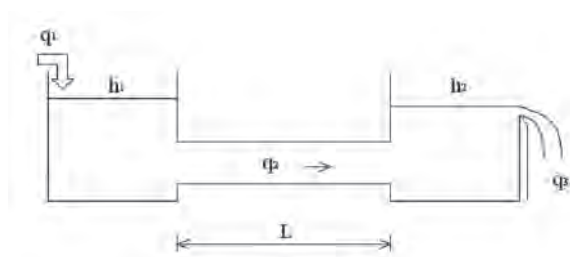


Fig.7 U 字管の水路構造を形成した要素
The element which formed the water channel structure of the U-tube

$$q_3 = C_w B (h_2 - W)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (5)$$

A: 管の断面積, L: 管の延長, P_1 : 上流側水槽の面積, P_2 : 下流側水槽の面積, B: 堰幅, C_w : 堰の越流係数, g: 重力加速度, W: 堰の高さ, f: 摩擦損失係数（マンニングの公式）である。ただし、管の摩擦損失係数 f は、管路の水理計算ではヘイゼン・ウィリアムズの公式の係数を用いることが一般的であるが、本稿では、関谷の方法に従ってマンニングの公式の係数とし、値は 0.012 とした。

次に、(2) 式の運動方程式を線形化する。脈動現象は平衡状態からの変動であると見なすと、水深 h 、流速 v 、および流量 q の変動を大文字 H 、 V 、および Q で表し、添え字 m で平衡値を表して、(2) 式の運動方程式の摩擦項（右辺第 3 項）を線形化すると次式になる。

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{P_1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{g}{L} (H_1 - H_2 - FV_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{Q_2 - Q_3}{P_2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$Q_2 = V_2 A \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Q_3 = KH_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$K = 1.5 C_w B \sqrt{h_{2m} - W} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$F = fv_{2m}/g \quad \dots\dots\dots (12)$$

(6) 式～(8) 式をラプラス変換すると、次式になる。

$$sH_{1s} = \frac{Q_{1s} - Q_{2s}}{P_1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$sV_{2s} = \frac{g}{L} (H_{1s} - H_{2s} - FV_{2s}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$sH_{2s} = \frac{Q_{2s} - Q_{3s}}{P_2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$$Q_{2s} = V_{2s} A \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_{3s} = KH_{2s} \dots\dots\dots (17)$$

入力 Q_1 と出力 Q_3 の比は、伝達関数 $G(s)$ と呼ばれる。

$$G(s) = \frac{Q_{3s}}{Q_{1s}} \dots\dots\dots (18)$$

よって、この単純なオープンタイプパイプラインにおける 1 対のスタンドからなる要素の伝達関数は次式になる。

$$G(s) = \frac{Q_{3s}}{Q_{1s}} = \frac{1}{1 + as + bs^2 + cs^3} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$a = \frac{P_2}{K} + \frac{FP_1}{A} + \frac{P_1}{K} \dots\dots\dots (20)$$

$$b = \frac{P_1 P_2 F}{AK} + \frac{P_1 L}{gA} \dots\dots\dots (21)$$

$$c = \frac{P_1 P_2 L}{gAK} \dots\dots\dots (22)$$

Q_1 の定常応答の振動特性にのみに焦点を当てると、正弦波状に変化させて十分に時間が経過して定常状態になったときの伝達関数は、ラプラス演算子 s を $i\omega$ に置き換えて次式になる。ここで、 i は虚数、 ω は角周波数とする。

$$G_\omega = \frac{1}{1 + ai\omega + b(i\omega)^2 + c(i\omega)^3} \dots\dots\dots (23)$$

入力 Q_1 と出力 Q_3 の振幅の比は伝達関数の絶対値 $|G(s)|$ (ゲインと呼ぶ) で表される。

ゲインは通常は対数 $20 \times \log$ で表されるので、次式になる。

$$20 \log_{10} |G_\omega| = 20 \log_{10} \sqrt{\frac{(1 - b\omega^2)^2 + (-a\omega + c\omega^3)^2}{(1 - b\omega^2)^2 + (a\omega + c\omega^3)^2}} \dots\dots\dots (24)$$

多段にスタンドが連続したオープンタイプパイプラインの水路システムは、上記の要素を連結して表すことが

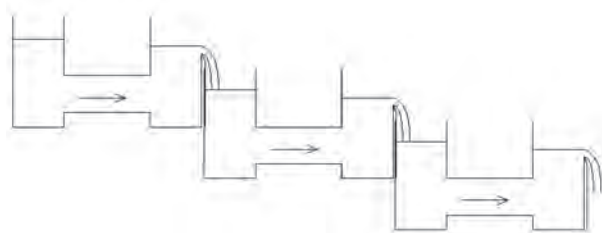


Fig.8 多段にスタンドが連続したオープンタイプパイプライン
The open type pipeline system in which
the stand continued multistage

できる (**Fig.8**)。つまり、 m 番目下流のスタンドにおける伝達関数は、次式になる。

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{m-1} \cdot G_m \dots\dots\dots (25)$$

V 結果と考察

解析する手順は、はじめに送水が調整池を経由しない場合について解析を行い、次に送水が調整池を経由した場合について同様の解析を行った。

1 連続した多段のスタンドにおける脈動特性

A 幹線と B・C 支線のオープンタイプパイプライン区間について、周波数応答法によって定常応答の固有振動特性を求めた。

流量は、最大流量が流れると考えられる時期を選定し、平成 8 年の 7 月 6 半月における通水量が流れている場合を設定した (**Table 1**)。A 幹線の上流側スタンド二次水槽の呑口において空気連行が生じて流量が変動した場合を想定し、その流量変動が正弦波として生じるものとした。

各スタンドでは上流からの流入量の変化によって下流側の流量は変化するので、多段に連続したスタンドは、上流側の応答が下流側のスタンドの入力となる。よって、上流側のスタンドの応答を下流側のスタンドの入力とした多段に連続したスタンド群の周波数特性を、A 幹線、B 支線、および C 支線の順にそれぞれ **Fig.9** ~ **Fig.11** に示す。

A 幹線では、下流側に行くにしたがってゲインが大きくなっていることから、振幅の増大する影響が上流側から下流側へ向かって重なり合いながら徐々に伝達していることが **Fig.9** より判断できる。

同様に、B 支線と C 支線においても下流側の振幅が増大する。両支線では、A 幹線における振幅の増大の影響を受けるため、既に支線の始点となる No.13ST において、振幅の増大が大きく、その後、両支線の下流側に行くにつれて振幅がさらに増大していくことが明らかになった。この原因は、関谷が脈動増大現象の要因として指摘しているように、同程度のスタンドの寸法と管路延長が多段に連結しているので、各スタンドの水位変動の周期が重なり合ったためであると考えられる。

2 調整池の脈動防止効果

A 幹線、B 支線および C 支線において、M 調整池へ経由して送水した場合について前節と同じ方法で解析した。M 調整池の水面積は、実際の施設諸元より $66,000\text{m}^2$ である。流量は、前節と同様に最大流量が流れる時期を選定した (**Table 1**)。

No.10ST においては、No.12ST までの小口の分水量のために本線に少量を送水し、残量を M 調整池へ送水す

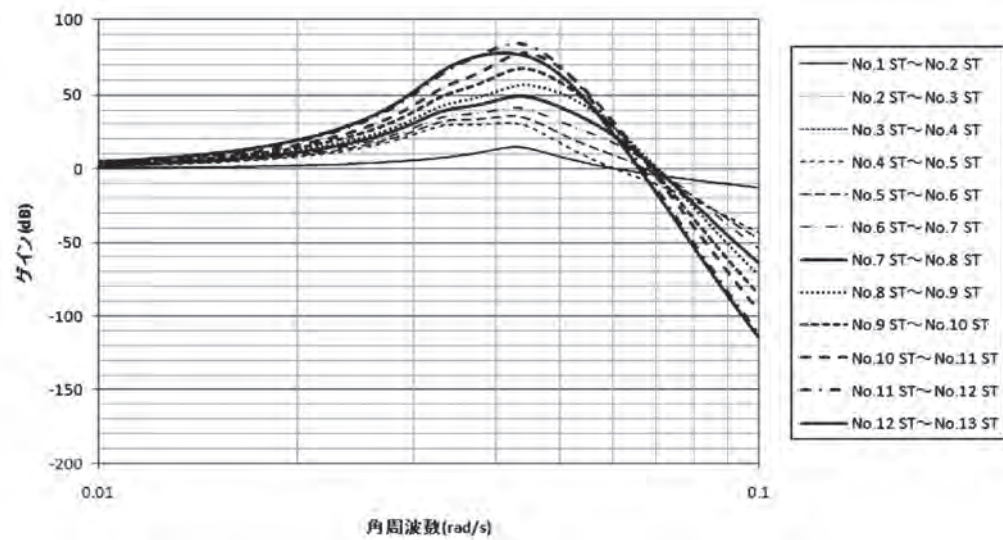


Fig.9 A 幹線の周波数特性
Frequency characteristics of the A trunk line

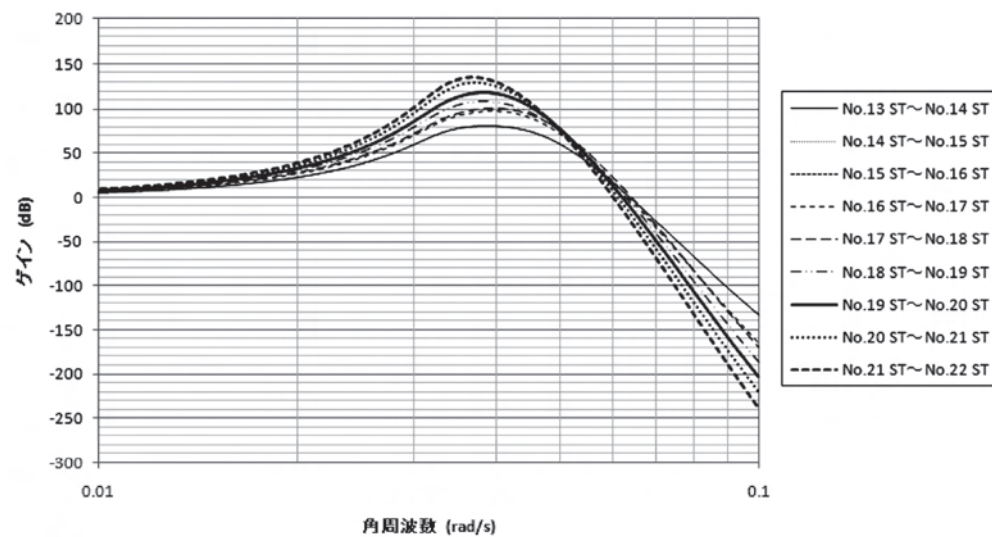


Fig.10 B 支線の周波数特性
Frequency characteristics of the B branch line

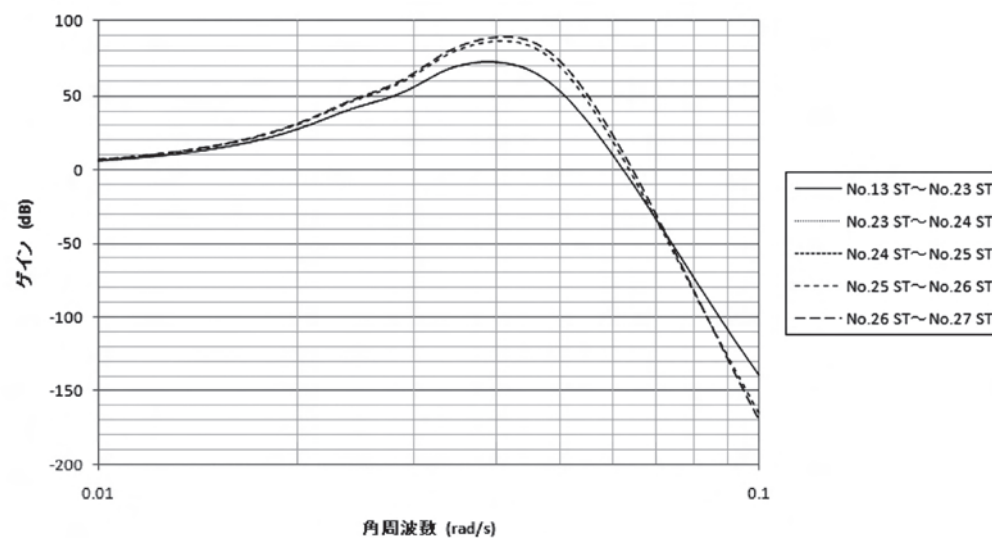


Fig.11 C 支線の周波数特性
Frequency characteristics of the C branch line

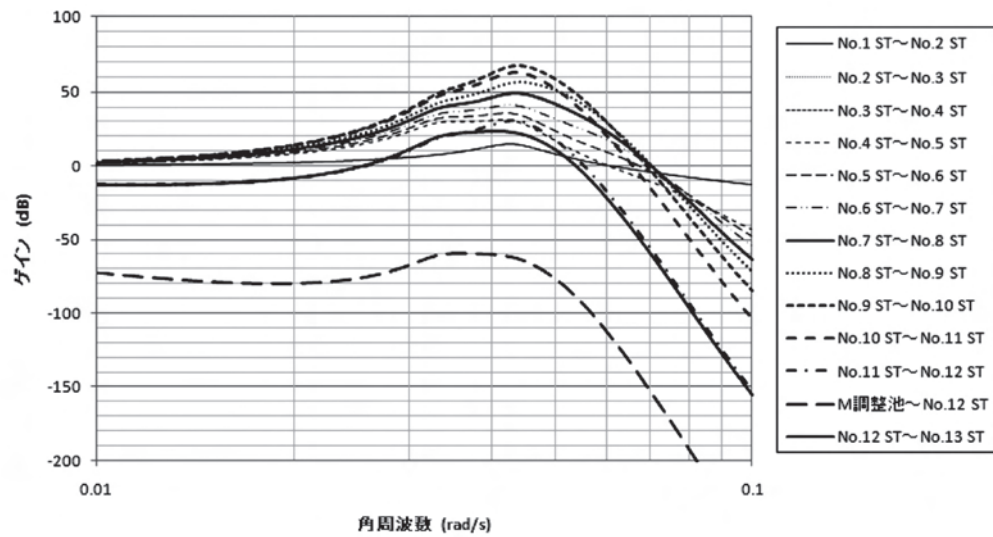


Fig.12 A 幹線の周波数特性
Frequency characteristics of the A trunk line

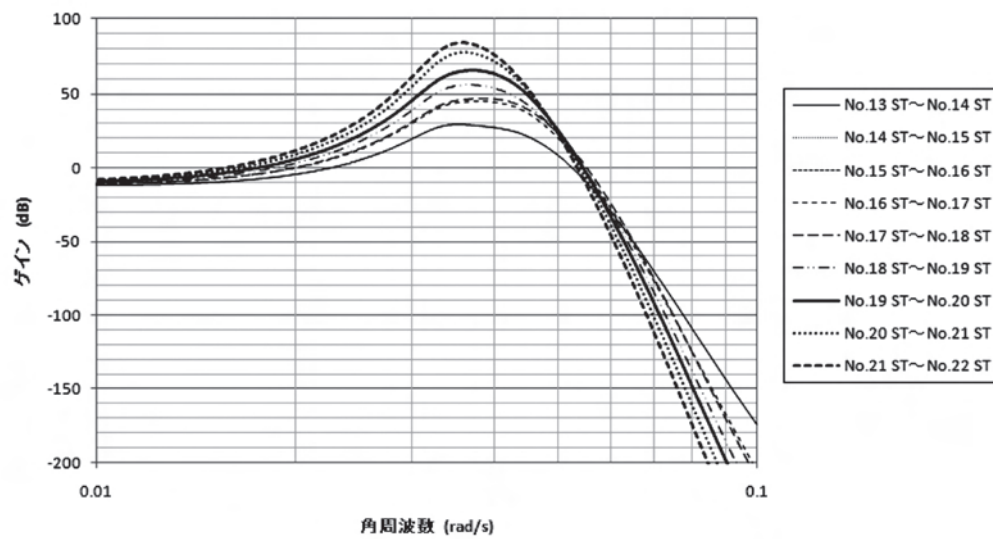


Fig.13 B 支線の周波数特性
Frequency characteristics of the B branch line

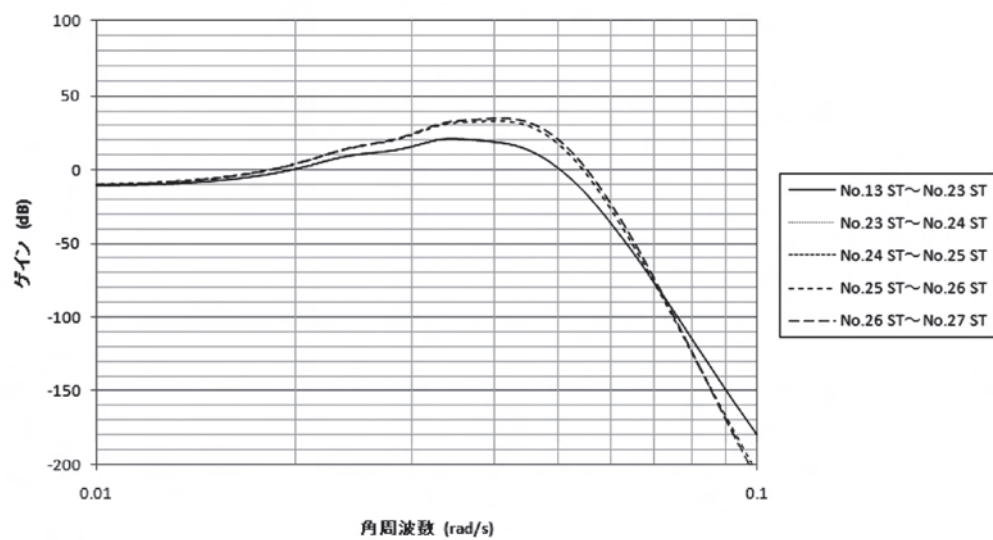


Fig.14 C 支線の周波数特性
Frequency characteristics of the C branch line

ることになっている。さらに、No.10ST から M 調整池への貯水は、余水吐からの越流となり、水理学的には下流側の影響が上流には伝わらないため、No.10ST と M 調整池の間には脈動現象は生じない。よって、No.10ST から No.11ST へはこの間の分水口の分水量のみを通水している。No.11ST の分水口において、予定通り分水されれば、No.11ST から No.12 ST への流量は生じないので、 $0.000001\text{m}^3/\text{s}$ として計算した。

M 調整池を経由した場合の A 幹線の周波数特性を Fig.12 に示す。同様に、B 支線と C 支線の周波数特性をそれぞれ Fig.13 と Fig.14 に示す。

Fig.12 より、A 幹線では、No.12ST よりも上流側は M 調整池の影響は受けなが、No.12ST よりも下流側では M 調整池の影響を受け、M 調整池は全周波数領域においてゲインが増大しないため、A 幹線の末端であり、か

つ、支線の入り口でもある No.13ST では振幅が低減することが明らかになった。

B 支線と C 支線では、上流側 ST において振幅が低減されている。しかし、B 支線は C 支線よりもスタンドの数が多いため、下流側へ向かって徐々に振幅が増大していく (Fig.13)。C 支線はスタンドが少ないために振幅の増大が抑制された (Fig.14)。

次に、M 調整池を経由した場合において、No.10ST から No.12ST の小口の分水口から取水残量が生じて、No.12ST において越流量が少量発生した場合を検討した。No.12ST における越流量を $0.001\text{m}^3/\text{s}$ として、周波数応答法を行った結果を、A 幹線、B 支線、および C 支線の順に Fig.15 ~ Fig.17 に示す。

No.12ST における越流量が $0.001\text{m}^3/\text{s}$ と少量であっても、B 支線と C 支線においてゲインが大幅に増加した。

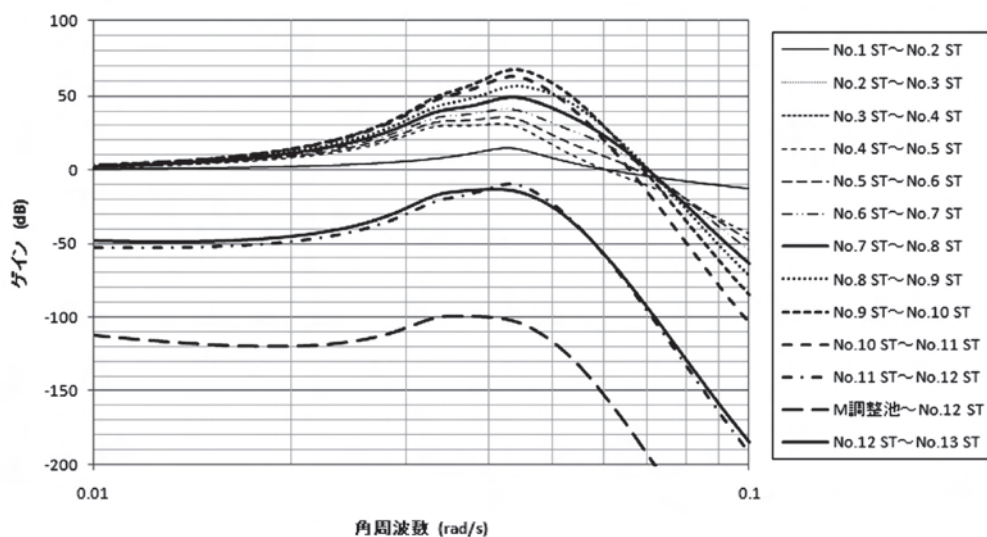


Fig.15 A 幹線の周波数特性
Frequency characteristics of the A trunk line

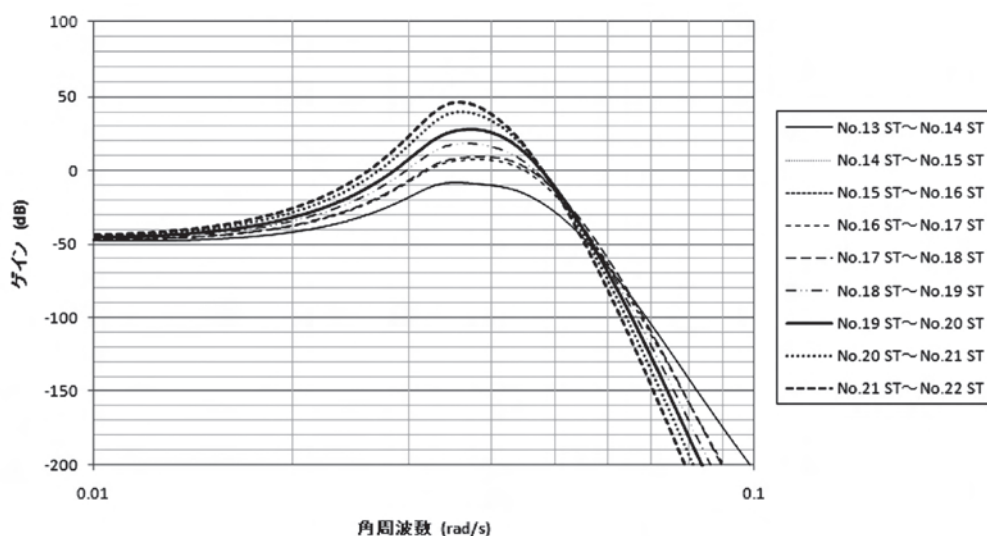


Fig.16 B 支線の周波数特性
Frequency characteristics of the B branch line

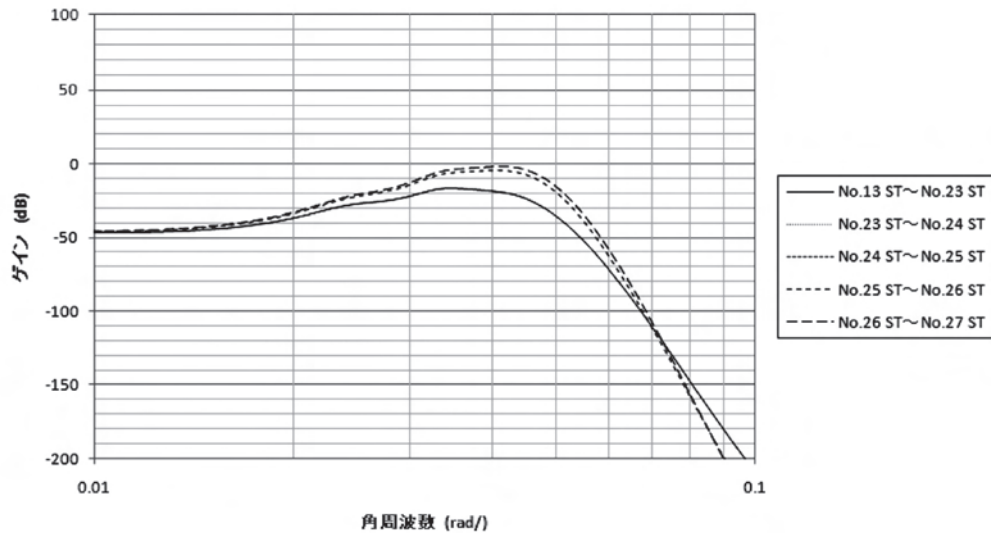


Fig.17 C支線の周波数特性
Frequency characteristics of the C branch line

つまり、水位の振幅が増大して脈動現象が生じることが明らかになった。この傾向は、現地観測においても同様の傾向が確認されていた。よって、中間調整池による脈動現象の防止効果を発現させるためには、少量であっても調整池を経由せずに下流側に送水してはならないことが示唆された。

3 脈動防止に必要な水面積

脈動防止に必要な水面積を求める式は、関谷によって、以下のように導出された。

脈動現象による水位の変動を減勢させるためには、全周波数領域で入力と出力の比である伝達関数 $G(s)$ が 1 より小さくならなければならない。つまり、 G_ω に関する (23) 式の右辺の分母が 1 より大きければ良い。よって、分母の絶対値が 1 より大きいと次式になる。

$$\sqrt{(1-b\omega^2)^2 + (a\omega - c\omega^3)^2} > 1 \quad (26)$$

これを展開すると次式になる。

$$\omega^4 + \frac{(b^2 - 2ac)}{c^2} \omega^2 + \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} > 0 \quad (27)$$

ここで、第 2 項と第 3 項の係数を M と N とおくと、

$$M = \frac{(b^2 - 2ac)}{c^2} \quad (28)$$

$$N = \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} \quad (29)$$

次式のように整理される。

$$\omega^4 + M\omega^2 + N > 0 \quad (30)$$

この不等式が成り立つためには、 $M > 0$ の場合、 $N > 0$ となり、 $M < 0$ の場合、 $M^2 - 4N < 0$ となる必要がある。以下にそれぞれの場合において、上流側水槽の水面積 P_1 の算定方法を記す。

3.1 $M > 0$ の場合

この条件を満たすには、 $N > 0$ でなければならない。よって、

$$N = \frac{(a^2 - 2b)}{c^2} > 0 \quad (31)$$

ここで、 a , b , および c を代入すると次式に変形できる。

$$\left(\frac{P_2}{K} + \frac{FP_1}{A} + \frac{P_1}{K} \right)^2 - 2 \left(\frac{P_1 P_2 F}{AK} + \frac{P_1 L}{gA} \right) > 0 \quad (32)$$

これを P_1 について整理すると以下の 2 次方程式になる。

$$\left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K} \right) P_1^2 + 2 \left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA} \right) P_1 + \frac{P_2^2}{K^2} > 0 \quad (33)$$

2 次方程式の解の公式より、全周波数領域でゲインが負になるための調整池の水面積 P_1 は次式になる。

$$P_1 > \frac{-2 \left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA} \right) \pm \sqrt{4 \left(\frac{P_2}{K^2} - \frac{L}{gA} \right)^2 - 4 \left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K} \right)^2 \frac{P_2^2}{K^2}}}{2 \left(\frac{F}{A} + \frac{1}{K} \right)} \quad (34)$$

3.2 $M < 0$ の場合

この条件を満たすためには、 $M^2 - 4N < 0$ でなければならない。

よって、

$$4N - M^2 = 4 \left(\frac{(a^2 - 2b)}{c^2} \right) - \left(\frac{(b^2 - 2ac)}{c^2} \right)^2 > 0 \quad (35)$$

この式を展開して整理すると、次式になる。

$$8c^2 + b^3 - 4abc < 0 \quad \cdots \cdots \cdots (36)$$

ここで、 a 、 b 、および c に代入して式を展開し、 P_1 について整理する。その結果、全周波数領域でゲインが負になるための調整池の水面積 P_1 は次式になる。

$$P_1 > \frac{4gKAL^2P_2^2 - 4g^2ALFP_2^3}{4(g^2KLF^2P_2^2 + gK^2L^2FP_2 + g^2ALFP_2^2 + gKAL^2P_2)} - (g^3F^3P_2^3 + 3g^2KLF^2P_2^2 + 3gK^2L^2FP_2 + K^3L) \quad (37)$$

3.3 全周波数領域でゲインが負になるための M 調整池の水面積の算定

M 調整池と No.12ST の二次水槽との間について、上記の計算方法を適用して、全周波数領域でゲインが負になる M 調整池の水面積 P_1 を算定する。

ここで想定する流況は、事例地区の通水量が最大となる 7 月 6 半月期を想定する。No.10ST から M 調整池への流入量は $1.55\text{m}^3/\text{s}$ として、No.10ST から No.11ST への通水量はその間の分水路の分水量のみとして、No.11ST から No.12ST への通水量は無いものとした。この条件下において、導出した M を算出すると、0.16 となり正であるので、 $M > 0$ の場合の計算方法を適用して、M 調整池の水面積 P_1 を算定すると、No.12ST の二次水槽において脈動現象を生じさせないためには、M 調整池の水面積を $6,890\text{m}^2$ 以上確保することが必要である。M 調整池の水面積は $66,000\text{m}^2$ であることから、脈動現象の防止に十分効果があったことが示唆された。

VI 結 言

周波数応答法を用いて、オープンタイプパイプラインシステムにおける一対のスタンドの流入と流出をシステムの入力と応答の関係とみなし、そのゲインを解析することによって、スタンド間の脈動現象が増幅を検討した。脈動現象の影響は下流側へ伝播するが、中間調整池によって下流側の脈動現象を防止できることが、周波数応答法の結果から示唆され、同様の現象が現地試験によって確認された。よって、周波数応答解析はオープンタイプパイプラインシステムの設計において脈動現象を評価することができる有効な手法であると考えられる。事例地区では、A 幹線においては、M 調整池の水面積 $6,890\text{m}^2$

以上の確保が必要であることがわかったが、実際に M 調整池の水面積は十分確保されていたために脈動現象による水位の振幅が低減した。よって、中間調整池がオープンタイプパイプラインシステムにおける脈動現象の防止に効果を発現したと言える。ただし、十分な広さの水面積を持つ中間調整池があっても、No.12ST において越流した量が少量であれば、この小さな流量変動によって下流側の支線において脈動現象が増幅する傾向が現地観測と周波数応答法の両方から得られた。この水理現象は調整池の脈動防止効果を発現させるために注意すべき点である。また、周波数応答解析が、このような小さな流動変動によって生じる脈動現象も現地観測の水理現象と同じように再現することができたことは、オープンタイプパイプラインシステムの設計手法としての有効性を示すものであると考えられる。

参考文献

- Edward H. Taylor, A. M. Asce, Arthur F. Pillsbury, Thomas O. Ellis, and George A. Bekey (1852): Unsteady Flow in Open-type pipe Irrigation Systems, *American Society of Civil Engineers Transactions*, **2793**, 143-161
- 松下 玄 (1984): 越流スタンドの空気連行特性, 農土論集, No.110, 101-108
- 松下 玄 (1990): 越流型オープンタイプパイプラインの脈動現象について, 農土論集, No.149, 67-78
- 松下 玄 (1991): 越流型オープンタイプパイプラインの脈動対策について, 農土論集, No.149, 85-100
- 中 達雄・田中良和・向井章恵 (2003): 施設更新に対応する水路システムの性能設計, 農土誌, 71 (5), 417-422
- 農林水産省 農村振興局 (2001): 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」技術書, 584-586
- 関谷 剛 (1988): オープンタイプパイプラインのサージ特性とその低減法の解析, 農土誌, 56 (8), 765-770
- 吉野秀雄 (1984): パイプライン系のサージ現象解析のための汎用数理モデルの開発, 農土試技報, 24, 61-81

A Case Study on Prevention Effect of Surging Phenomenon in Open Type Pipeline by Regulating Reservoir

TANAKA Yoshikazu, MUKAI Akie and TARUYA Hiroyuki

Summary

In the open type pipeline, there is a case in which surging phenomenon is generated in proportion to the condition of structure and flow rate of water channel in usual water management. The surging phenomenon made unstable of water pressure in the stand and pipe line, and the diversion efficiency is made to lower. In addition, it is made to overflow from the stand, and the secondary damage to the circumference is caused. Using the frequency response method, whether surging phenomenon between stands in the open type pipeline attenuates or amplifies were examined. It was got that the surging phenomenon of the upstream could prevent the effect on the downstream by the Regulating Reservoir from the result of the frequency response method. However, if a little quantity water overflow to downstream without passing via the regulating reservoir, trunk line tends to amplify surging phenomenon in the branch line of the downstream.

Keywords : Open type pipeline, surging phenomenon, regulating reservoir, frequency response method, fast Fourier transform, Laplace transform