
セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と
定流量弁の自励振動に関する研究

(課題番号 14560202)

平成14年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成16年10月

研究代表者 稲垣仁根
(宮崎大学農学部助教授)

目次

I. はしがき	1
II. 研究組織	2
III. 交付決定額（配分額）	2
IV. 研究発表	2
VI. 研究報告	
研究報告(I)--圧力制御機能の実験的検証--	3
研究報告(II)--定流量弁の作動による振動発生--	14
研究報告(III)--サージステッキによる振動の抑制効果--	23
研究報告(IV)--屋内短管路装置による実験的検証--	30

は し が き

クローズドまたはセミクローズドパイプラインは、圧力の変動幅が大きく、その影響が広範囲に波及するため、流量管理の上からは使いにくいシステムであり、分水量の管理労力の軽減と水資源の合理的な運用のために、定流量弁の導入が図られている。

自動減圧弁と定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインを導入した地区において、自動減圧弁が過剰に開閉し、これが収束しないで大きな圧力変動が長時間継続した事例が発生している。

現場調査でのデータを分析したところ、自動減圧弁と定流量弁の間に自励振動が発生し、過剰な圧力が発生したものと予想されるが、その明確な発生原因と対策の研究が必要となっている。今後、自動減圧弁と定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入が要請されると考えられるので、このシステムを安全に稼働させるための技術の確立が必要となっている。

自動減圧弁と定流量弁を組み合わせて使用するシステムについて、現地および屋内での実証試験を実施して、現場で発生した現象を再現し、自励振動の発生原因とその対策を検討する。さらに、振動抑制対策の効果を現地実験で確認した。

本研究により、自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせたシステムについての安定性と圧力振動の抑制対策については、以下のような知見が得られた。

①直動式定流量弁の連成振動

直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性がある。一方、直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと考えられる。

②自動減圧弁の応答感度の調節効果

減圧弁を用いた管路における圧力の自励振動の発生は、減圧弁の応答感度を鈍くすることのみでは、完全に抑制できないと判断される。

③サージステッキによる圧力振動の抑制効果

パイプラインの振動抑制には、自由表面を有するサージステッキの設置が非常に有効である。なお、サージステッキの口径は、本管の口径と同程度が適当である。

④安全弁による圧力振動の抑制効果

自動減圧弁の上下流側に設置した安全弁の規模が小さい場合は、安全弁が自動弁の連成振動に起因する圧力振動に反応して断続的に作動しても、圧力振動が減衰しないと考えられる。安全弁の口径は本管口径と同口径程度が適当である。

なお、平成 14 年度～平成 15 年度の 2 ケ年間、文部科学省科学研究費基盤研究(C)(2)を受けたことに対して、ここに関係者各位へ心より感謝申し上げる。

本研究の成果が関係各位の参考資料となれば幸甚である。

平成 16 年 10 月

研究代表者 稲垣 仁 根

研究組織

研究代表者 : 稲垣 仁根 (宮崎大学農学部助教授)

研究分担者 : 中園 健文 (宮崎大学農学部助教授)

交付決定額 (配分額)

	直接経費	間接経費	合計
平成14年度	2,500	0	2,500
平成15年度	500	0	500
総計	3,000	0	3,000

研究発表

(1) 学会誌等

1) 奈良大和・斎藤正樹・稲垣仁根・中園健文・秋吉康弘

水柱分離を考慮したポンプ送水系パイプラインの設計手法, 雨水資源化システム学会誌, 第9巻, 第1号, 平成15年7月, pp.25 - 36.

2) 稲垣仁根・奈良大和・斎藤正樹・中園健文

ポンプ急停止時における水柱分離およびスイング式逆止弁による水撃圧抑制の解析とその現地検証, 農業土木学会論文集, 第231号, 平成16年6月, pp.83 - 96.

(2) 口頭発表

1) 稲垣仁根・奈良大和・斎藤正樹

ポンプ送水系パイプラインにおける水柱分離について, 第10回日本雨水資源化システム学会研究発表会, 平成14年11月

2) 奈良大和・斎藤正樹・稲垣仁根

逆止弁によるポンプ急停止時の水撃圧抑制対策について, 平成15年度農業土木学会大会講演会, 平成15年7月

3) 奈良大和・斎藤正樹・稲垣仁根

ポンプ急停止時における水柱分離の現地計測, 第84回農業土木学会九州支部講演会, 平成15年10月

4) 奈良大和・斎藤正樹・稲垣仁根

逆止弁によるポンプ急停止時の水柱分離対策とその現地計測, 第11回日本雨水資源化システム学会研究発表会, 平成15年11月

5) 稲垣仁根・奈良大和・藤澤 豊・斎藤正樹

直列配置したスイング式逆止弁によるポンプ急停止時の水撃圧抑制対策について, 平成16年度農業土木学会大会講演会, 平成16年9月

(3) 出版物

なし

セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (I)

—圧力制御機能の実験的検証—

稲垣仁根¹・斎藤正樹²・奈良大和³・中園健文¹・秋吉康弘⁴

Studies on self-induced vibration of automatic pressure regulator and constant flow valve in the semi closed pipeline(I)

— The experimental verification of the pressure control function —

Hitone Inagaki¹, Masaki Saito², Yamato Nara³, Takefumi Nkazaono¹
and Yasuhiro Akiyoshi⁴

1 はじめに

農業用パイプラインシステムの規模と水管理の最適化を目指して自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入が要請されている。このパイプラインは、圧力の高くなりがちな末端側において、自動減圧弁により過剰な圧力を削減して塩化ビニル管の使用を可能とし、さらに支線管路の途中に配置した自動定流量弁により末端側での過剰な分水操作の影響を排除できることに特徴がある。しかし、自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインを導入した地区において、自動減圧弁が過剰に閉開し、これが収束しないで大きな圧力変動が長時間継続した事例が発生している。本稿は、自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせて使用したシステムについて、現地での実証試験を様々な条件で実施して、現場で発生した現象を再現し、自励振動の発生状況を検証したものである。

2 自動弁を組み合わせたパイプライン

自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインについて、その特徴と課題を整理する。

2.1 自動減圧弁を用いたパイプライン

農業用パイプラインの中でクローズドパイプラインは、水源側の位置エネルギーを有効に活用できるメリットがある反面、管体への作用圧力が大きくなるため、高価な耐圧強度の大きい管種を使用しなければならないという問題がある。そこで、末端側に必要な位置エネルギーを確保しつつ、過剰なエネルギーは減圧システムにより削除

する目的で、フロートバルブと大気解放水槽を組み合わせたセミクローズドパイプラインが導入されている。

しかし、大気解放水槽を設置する場合は、パイプラインの縦断線形により設置する位置と標高が制約を受ける場合があり、水槽の設置が困難であるか、または可能であってもパイプラインが遠方に迂回する必要があるため、コストが増加する場合がある。

著者らは、大気解放水槽の設置が困難な場合は、自動減圧弁と安全弁を組み合わせた低圧化システムを採用し、最適な位置で設計圧力を段階的に減少させて、低圧用の安価なパイプの採用を行い、イニシャルコストの削減を図る方法を提案している(斎藤ら 1996; 斎藤ら, 1997)。この自動減圧弁を用いたセミクローズドパイプラインでは、静水時の水位も遮断できる減圧機能が要求されるが、現在、この機能を満たす新型の自動減圧弁が提供されている(稲垣ら 1996; 稲垣ら 1998)。さらに、設計基準においても「比較的小規模な配水系パイプライン」においては安全弁との併用を前提として認められ、現地での導入が始まっている(稲垣ら 1999a; 農林水産省 1998a)。

また、図 1 に新型の自動減圧弁の作動機構の概要図を示すが、減圧弁上下流の管路圧力を細管で取り出し、2次圧を一定にするように外部のパイロット弁で弁体を駆動する方式である。実際の2次圧が設定圧より大きければ、1次側圧力を弁体上部に作動させて、閉方向に駆動し、2次圧が設定圧より小さい時には、2次側圧力を弁体上部に作動させて、開方向に駆動することに特徴がある。2次圧が設定圧力付近にあり安定している状態では、弁体上部にはパイロット弁内で1、2次圧が混合された圧力が作用している。

応答速度の調節は、減圧弁上流側の圧力取出細管に設置したバルブの開度を変化させて、パイロット弁に導入する1次圧の大きさを調節することにより行う。バルブを開けば、管路の1次圧がそのまま導入されるので、応答速度は速くなるが、バルブを絞ればパイロット弁に導入される1次圧が管路圧力より小さくなるので応答速度が遅くなる。このバルブの開度は、現地で調節する必要があり、通常は全開に設定しておき、段階的に開度を絞って、減圧弁の応答が安定する開度を見つける方式で対応

¹宮崎大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

²クラウンエンジニアリング(株) 副社長 Vice President, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

³クラウンエンジニアリング(株) 技師 Engineer, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

⁴宮崎大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

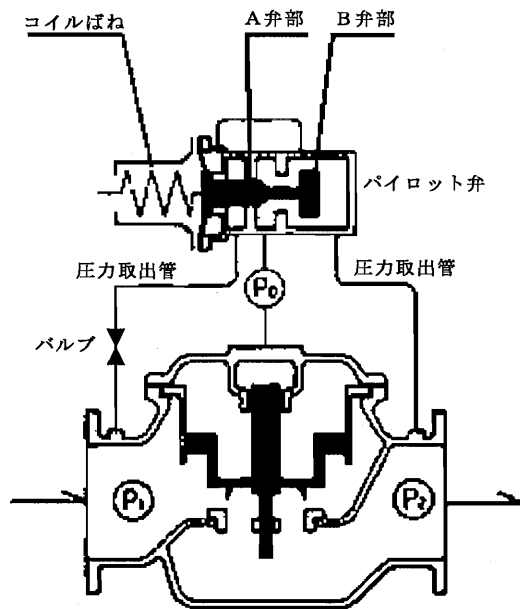


図 1: 自動減圧弁の作動機構

している。

2.2 定流量弁を用いた流量制御システム

クローズドまたはセミクローズドパイプラインは、圧力の変動幅が大きく、その影響が広範囲に波及するため、流量管理の上からは使いにくいシステムであり、分水量の管理労力の軽減と水資源の合理的な運用のために、管路圧力が変動しても流量を一定に制御する自動定流量弁の導入が図られている（稲垣ら 1999b; 農林水産省 1998b）。

自動定流量弁には、管路の中にバネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁（農業土木事業協会 2000a）と管路の圧力を細管で取り出し、外部のパイロットで駆動するパイロット弁式（畑地農業振興会ら 1992; 農業土木事業協会 2000b）がある。パイロット弁式は、期別流量の設定が可能となるようにハンドルで設定流量が可変式であるが、直動式は内部の流量調整管を選択する固定式である。図 2 に直動式定流量弁の作動機構の概要図を示す。

今後は、パイプラインシステムの規模と水管理の最適化を目指して自動減圧弁と定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入が要請されると考えられる。

2.3 弁と管路流の自励振動

管路には、圧力や流量を制御するために減圧弁や流量弁が設置されるが、これらの弁が管路の圧力や流量の変化により自動的に駆動する場合は、弁と管路が接続されたシステムにおいて、弁の動特性が自励振動に対して安定であっても、弁と管路内の流体とが連成した激しい自励振動が発生する場合がある。この弁と管路から成るシステムにおける自励振動は、プラントや油圧管路系で多く発生しており、さまざまな弁・管路系について研究されている（谷口 修 1976）。

2.3.1 弁と管路の連成振動の事例

弁と管路の連成振動については、スプール弁やポペット弁等を対象とした事例 (1)・(2) と農業用の自動減圧弁を対象とした事例 (3)・(4) が明らかとなっている（日本機械学会 2003）。

- (1) 流れがあると閉じる弁が設置されている場合、管路内の流体振動の弁振動に対する遅れが原因で自励振動が発生する。
- (2) 弁を上流の圧力が上昇すると流速が減少するような条件で使用すると、管路の固有振動数が弁より低ければ、管路の圧力波動と弁振動が連成して、自励振動が発生する（藤井 1952）。
- (3) 農業用水路において自動応答型の減圧弁を使用した場合、減圧弁が外乱に敏感に反応するように応答感度を設定すると、管路の圧力波動と弁振動が連成して、自励振動が発生する（長ら 1987; 長ら 1988）。
- (4) 自動応答型の減圧弁の応答が速すぎるために、管路内圧力の自励振動が発生する場合は、減圧弁の応答感度を鈍くすることで自励現象を抑制できる（長ら 1988）。

2.3.2 自動減圧弁の自励振動と設計水圧

旧設計指針（農林水産省 1988）では、自動減圧弁を用いた場合でも、2次側のパイプラインの静水圧は上流側の静水圧が連続するものとして設計を行うとしている。これは、上記の (4) のように、自動減圧弁の自励振動を抑制するために、応答速度を鈍くすると、2次側圧力の制御機能が低下し、通水停止時に減圧弁上下流の水圧が連続することが根拠になっていた。

そのため、減圧弁を採用しても、設計水圧は減圧弁がない状況と同じになるため、イニシャルコストの削減に繋がらないことから、減圧弁が普及しなかった経緯がある。現在では、減圧弁の機能が改良が進んだので、小規模なパイプラインに限定して、2次側設計内圧の削減が認められている（農林水産省 1998a）。

2.3.3 自動減圧弁の応答感度と自励振動

自動減圧弁を用いた低圧化システムの導入は、減圧弁により2次側圧力を確実に設定圧力まで遮断することにより、低圧力用の安価な管材を安全に使用できるようにすることが目的である。従って、減圧弁を使用した場合の自励振動の発生を抑えるために、(4) のように2次側圧力の変化に対する応答を遅くして、制御性を低下させる対策は、低圧化システムとしては採用しがたいと判断される。

よって、2次側圧力の制御性を向上させるために、自動減圧弁の応答速度を確保する対価として、自励振動発生の可能性が高くなることは避けられないと考えられる。

2.3.4 減圧弁と定流量弁を組み合わせた場合の自励振動

バネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁は、弁体前後の圧力差が大きくなると、弁体が閉方向に移動して、通水断面積を減少させるため、弁の使用状況としては上記の (2) に近いと考えられる。

従って、自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせて使用する場合、自励振動の発生しやすい要因を内包する自動弁を直列に繋ぐことになるので、複数の自動弁の連成による自励振動の発生の可能性を考慮する必要がある。

表 1: 減圧弁と安全弁の設定圧力

機種	口径 mm	管心高 EL.m	HWL EL.m	余裕高 m	作動圧力標高 EL.m	作動圧力 MPa	設定流量 m ³ /s
安全弁 (上流) SF1	50	124.0	170.6	20.0	182.6	0.598	
自動減圧弁	200	124.0	139.0	0.0	139.0	0.153	
安全弁 (下流) SF2	40	124.0	139.0 <td 10.0	149.0	0.255		
直動式定流量弁 Q1	125	115.0				0.06~0.6	0.0185
直動式定流量弁 Q2	125	114.0				0.06~0.6	0.0185

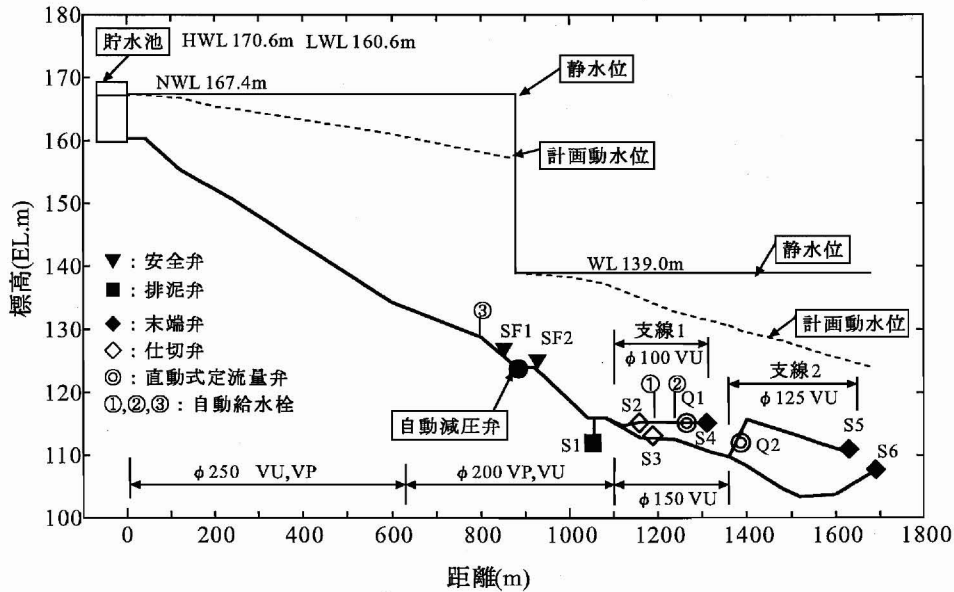


図 3: 実験パイプライン縦断図

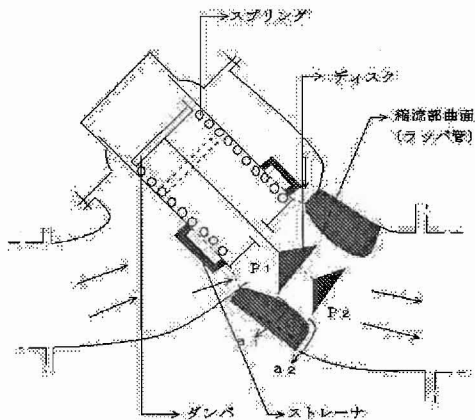


図 2: 直動式定流量弁の作動機構

3 実証パイプラインの概要

現地実証試験を行ったパイプラインは、図 3 のパイプライン縦断図に示すように、水源を貯水池とする延長約 1.7km、計画流量 0.0926m³/s の自然流下パイプラインである。水源貯水池の水位は、HWL 170.6m、LWL 161.6m であり、通常の管理水位は NWL 167.4m である。

さらに、貯水池より約 900m の地点で自動減圧弁により静水位 NWL 167.4m から約 28m 減圧して、減圧弁下流の制御水位を WL 139.0m とする 1 段減圧方式を採用している。なお、幹線末端の仕切弁 S6 は、実験中は常に閉鎖している。

また、貯水池から 1.1km と 1.3km の地点で幹線から支線へ分岐し、分岐した支線側に直動式定流量弁 Q1、Q2 が設置されている。従って、支線末端に設置した末端弁 S4、S5 を操作した場合、支線の途中に設置した直動式定流量弁により、幹線からの分水量が規制され、過剰な分水量が防止できるシステムとなっている。

付帯施設として、上流端から 1.1km の地点に排泥工 S1 を設置し、減圧弁の上流にフロート弁を用いた自動給水栓 ③ を、支線に自動給水栓 ①、② を設置している。制水弁として幹線に仕切弁 S3 を、支線に仕切弁 S2 を設置している。さらに、自動減圧弁の上下流側には、過剰な圧力を管路から放出するために、安全弁 SF1、SF2 を設置している。

減圧弁と安全弁の作動圧力および定流量弁の設定流量は表 1 に示すように設定している。その他の仕切弁、自動給水栓のフロート弁、末端弁、排泥弁の口径については、表 2 に示している。自動給水栓は、圃場の水面の高さが低下すると管路の分水口を押さえていたフロートが開いて、導水する機構になっている (農業土木事業協会 2000c)。

4 実証試験の内容

実証試験の内容は、表 2 の実証試験の条件一覧表に示すが、左端の欄のテスト NO. は、実験の内容毎の区切りを示しており、計測結果を時系列的に図示した図 4~8 において、縦線と番号の組み合わせで区分の境を示している。

実験は、テスト NO1~17 と 17~50 の大きな二つのス

表 2: 実験内容とバルブ操作条件

テスト NO.	幹線				支線 1			支線 2	
	1次側 フロート弁③ (φ 75)	自動減圧弁 パイロット弁 (φ 200)	排泥弁 (φ 75) S1	仕切弁 (φ 150) S2	自動給水栓 フロート弁 (φ 75)		末端弁 (φ 100) S4	仕切弁 (φ 150) S3	末端弁 (φ 125) S5
					①	②			
		△ 45°		●			▲	●	▲
1 - 2		○全開	●	●			▲	●	▲
2 - 3		○		●			▲	●	▲
3 - 4		△	●	●			▲	●	▲
4 - 5		△		●			▲	●	▲
5 - 6		△					▲	●	▲
6 - 7		△					▲		▲
7 - 8		△	●				▲		▲
8 - 9		○	●				▲		▲
9 - 10		○					▲		▲
10 - 11		○		●			▲		▲
11 - 12		○		●			▲	●	▲
12 - 13		○		●			▲	●	●
13 - 14		○		●			▲	●	
14 - 15		△		●			▲	●	●
15 - 16		△		●			▲	●	
16 - 17		△		●			▲	●	▲
17 - 18		○		●			▲		▲
18 - 19		○					▲		▲
19 - 20		○	●				▲		▲
20 - 21		○					▲		▲
21 - 22		△	●				▲		▲
22 - 23		△					▲		▲
23 - 24		△		●			▲		▲
24 - 25		△		●	●		▲		▲
25 - 26		△		●			▲		▲
26 - 27		○		●	●		▲		▲
27 - 28		○		●			▲		▲
28 - 29		○		●					▲
29 - 30		○		●		●			▲
30 - 31		△		●		●			▲
31 - 32		□ 50°		●		●			▲
32 - 33		○		●		●			▲
33 - 34		○		●					▲
34 - 35		□		●		●			▲
35 - 36		□		●					▲
36 - 37		○		●			●		▲
37 - 38		□		●			●		▲
38 - 39		□		●					▲
39 - 40		□		●	●	●			▲
40 - 41		□		●					▲
41 - 42		□		●			●		▲
42 - 43		□		●		●	●		▲
43 - 44		□		●			●		▲
44 - 45		□		●					▲
45 - 46		○		●					▲
46 - 47	●	□		●			▲	●	▲
47 - 48		□		●			▲	●	▲
48 - 49	●	○		●			▲	●	▲
49 - 50	●	□		●			▲	●	▲
50 -		□		●			▲	●	▲

バルブ操作の凡例 ● : 全開, 空白 : 全閉, ▲ : 全開時流量の 1/5 流量に相当する開度

ページに分かれており、その間で試験は中断している。実験の概要は以下に示すとおりである。

- (1) テスト NO.1~5 : 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 を全開時流量の 1/5 程度の分水量になるように絞り気味に開いて、定流量弁 Q1, Q2 を稼働させ、幹線の排泥弁 S1 を開閉して、その影響を検証する。
- (2) テスト NO.5~10 : 支線 1, 2 の仕切弁 S2, S3 を全閉して、定流量機能を無効にし、支線の通水を停止した状態で、幹線の排泥弁 S1 を開閉する。その間に、自動減圧弁のパイロット弁の開度を 45° から全開へ増加させ、パイロット弁の感度調整の影響を検証する。
- (3) テスト NO.10~12 : 支線 1, 2 の仕切弁 S2, S3 を順次全開して、定流量弁 Q1, Q2 を作動させる。
- (4) テスト NO.12~17 : 支線 2 の末端弁 S5 を全開、全閉、全開時流量の 1/5 程度に絞った開度に変化させる。その間に、自動減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° へ減少させる。
- (5) テスト NO.18~23 : 支線 1, 2 の仕切弁 S2, S3 を全閉して、定流量機能と支線の通水を停止した状態で、幹線の排泥弁 S1 を開閉する。これ以降、テスト NO.46 までは、支線 2 の仕切弁 S3 は全閉したままとし、支線 2 の通水を停止した状態とする。その間に、自動減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° へ減少させる。
- (6) テスト NO.23~29 : 支線 1 の仕切弁 S2 を全開して、支線 1 を通水する。支線 1 の末端弁 S4 を全開時流量の 1/5 程度の分水量になるように絞り気味に開いた状態で、定流量弁 Q1 を稼働させ、同時に、支線 1 の自動給水栓①を開閉する。自動減圧弁のパイロット弁の開度を 45° から全開へ増加させる。
- (7) テスト NO.29~36 : 支線 1 の末端弁 S4 を全閉して、末端からの放流と定流量機能を停止した状態で、支線 1 の自動給水栓②を開閉する。自動減圧弁のパイロット弁の開度を 45°, 50°, 全開に変化させる。
- (8) テスト NO.36~39 : 支線 1 の自動給水栓を閉鎖し、定流量弁 Q1 を稼働させた状態で、末端弁 S4 を全開、全閉する。これ以降、自動減圧弁のパイロット弁の開度を 50° に設定する。
- (9) テスト NO.39~41 : 支線 1 の末端弁 S4 を全閉して、末端からの放流と定流量機能を停止した状態で、支線 1 の自動給水栓①, ②を開閉する。
- (10) テスト NO.41~44 : 支線 1 の末端弁 S4 を全開して、定流量弁 Q1 を稼働させた状態で、支線 1 の自動給水栓②を開閉する。
- (11) テスト NO.44~46 : 支線 1 の末端弁 S4 と支線 2 の仕切弁 S3 を閉鎖し、支線 1, 2 の通水を停止する。
- (12) テスト NO.46~50 : 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 を全開時流量の 1/5 程度の分水量になるように絞り気味に開いた状態で、定流量弁 Q1, Q2 を稼働させる。同時に、幹線の自動給水栓③を開閉する。自動減圧弁のパイロット弁の開度を 50° と全開に変化させる。

5 実験結果

自動減圧弁の通水停止時の圧力遮断性能、通水開始時の圧力制御性能、応答感度の調節効果および直動式定流量弁の連成振動について、実験結果を検証した。

5.1 通水停止時の圧力遮断性能

排泥弁 S1 を閉鎖して、通水が停止した場合の自動減圧弁の圧力制御機能については、テスト NO.6~7, 9~10, 18~19, 20~21, 22~23 で検証している。

さらに、自動給水栓のフロート弁①, ②を閉鎖して、通水が停止した場合については、テスト NO.28~29, 33~34, 35~36, 38~39, 40~41, 44~46 で検証している。

- (1) 排泥弁 S1 およびフロート弁①, ②を急に閉鎖すると、自動減圧弁の応答感度を良くしているため、減圧弁が急閉鎖して、1 次側に大きな圧力上昇を発生させる。さらに、この圧力上昇が大きな圧力振動を発生させている。
- (2) 排泥弁 S1 およびフロート弁①, ②の閉鎖により自動減圧弁の 2 次側圧力が上昇して、減圧弁が閉鎖する過程において、弁体が振動して、管路に大きな圧力変動を生じている。これは、自動減圧弁を小さい開度で使用するため、弁体が全開との往復を繰り返すチャタリングを生じていると考えられる。圧力変動は周期的で、その大きさは弁の 2 次側に比べて 1 次側が大きくなっている。通水の停止に伴う自動減圧弁の圧力振動が発生するが、時間の経過とともにその大きさが減少し、やがて一定値に収斂している。
- (3) 通水停止後の圧力は、1 次側が 0.45MPa(EL168.1m) であり、概ね貯水池の NWL167.4m 付近に収斂している。2 次側圧力は 0.2MPa(EL143.6m) であり、制御圧力標高 EL139.0m より約 5m 程度高い標高に収斂しており、減圧弁の応答遅れにより僅かな時間ではあるが、1 次側と 2 次側が連続したものと考えられる。

5.2 通水開始時の圧力制御性能

通水が停止した状態から、排泥弁 S1 を開操作した場合の自動減圧弁の圧力制御機能については、テスト NO.7~9, 19~20, 21~22 で検証している。

さらに、通水が停止した状態から、自動給水栓のフロート弁①, ②を開操作した場合については、テスト NO.24~25, 26~27, 29~33, 34~35, 39~40, 42~43 で検証している。

- (1) 通水を停止した状態から、排泥弁 S1 を開操作した場合は、減圧弁の応答遅れにより一時的に圧力が低下するが、短時間で回復している。圧力の低下は、減圧弁の 2 次側に比べて 1 次側が大きくなっている。
- (2) 通水を停止した状態から、自動給水栓のフロート弁①, ②を開操作した場合は、減圧弁の応答遅れにより一時的に圧力が低下し、その後、周期的な圧力変動を繰り返している。圧力変動は、排泥弁 S1 を開操作した場合に比べて周期が約 20 秒とかなり長く、また、時間が経過しても、変動の大きさがわずかに減衰するものの、圧力変動自体は収束する傾向にはない。

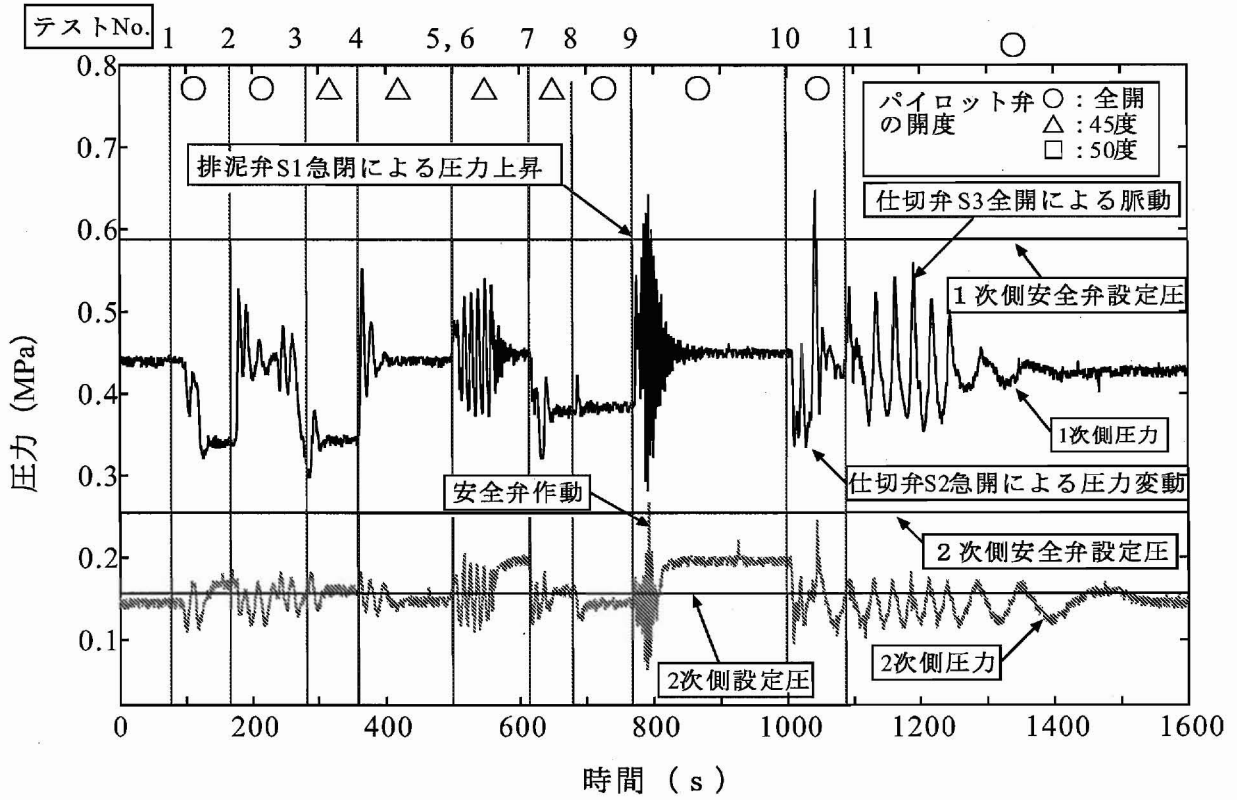


図 4: 実験結果 (テスト NO.1~12)

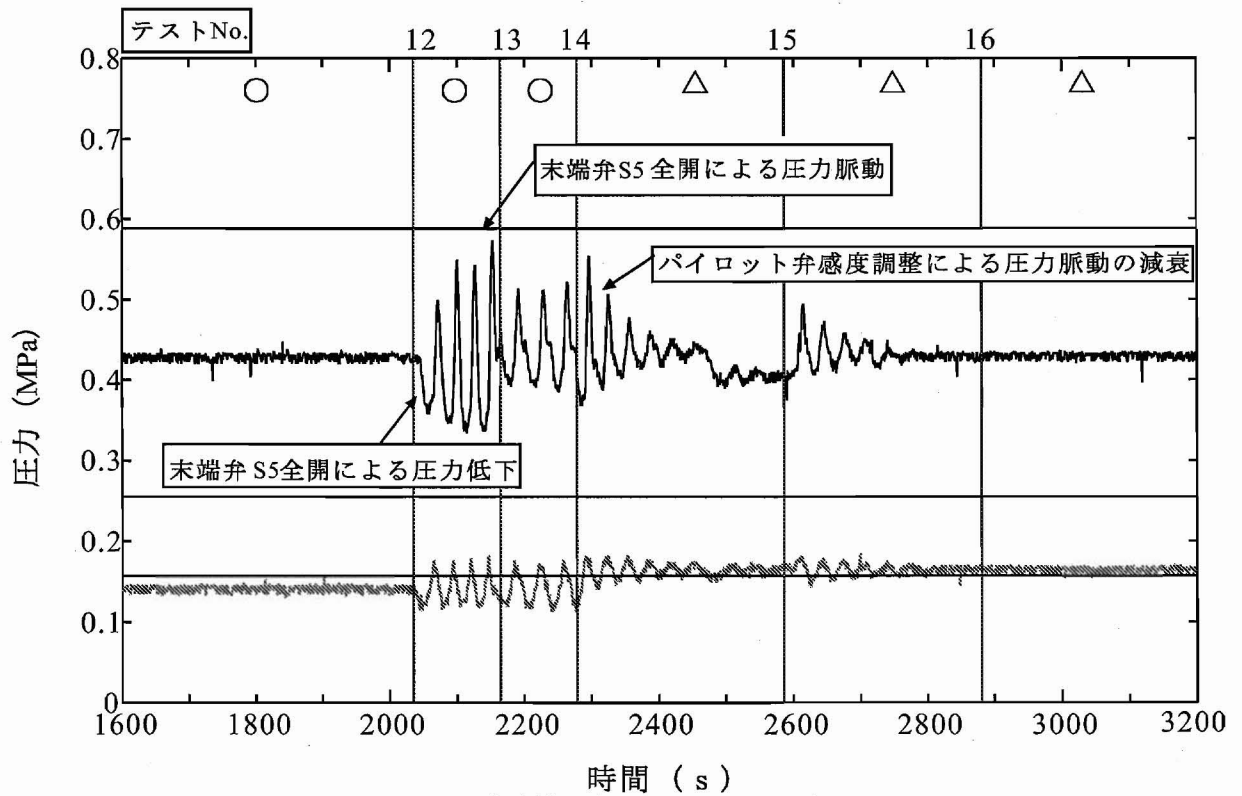


図 5: 実験結果 (テスト NO.12~17)

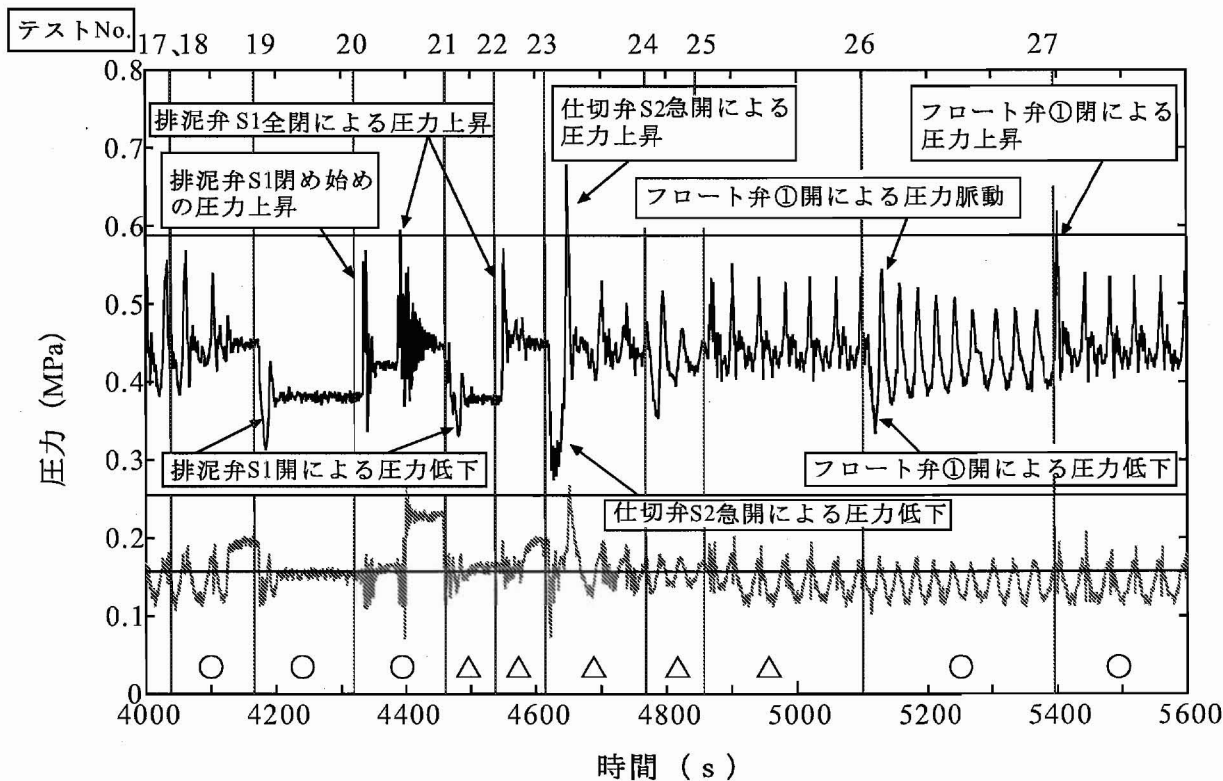


図 6: 実験結果 (テスト NO.17~28)

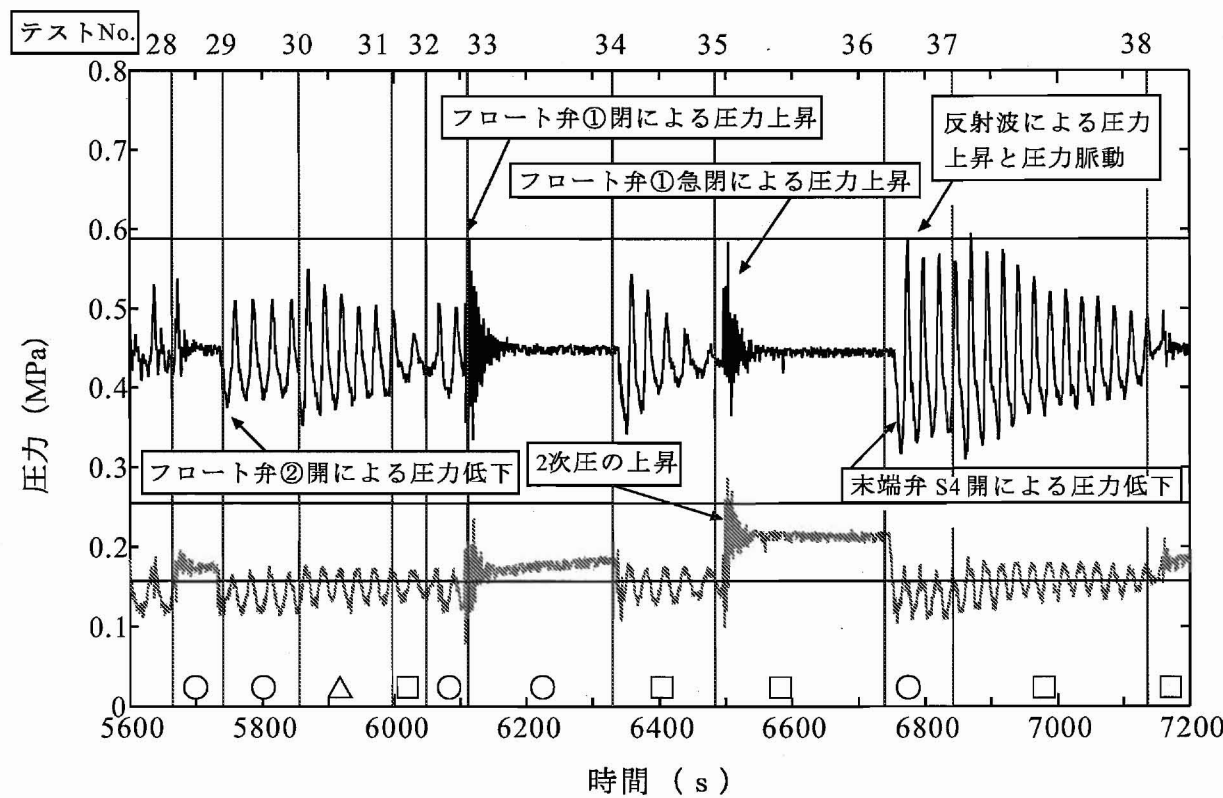


図 7: 実験結果 (テスト NO.28~38)

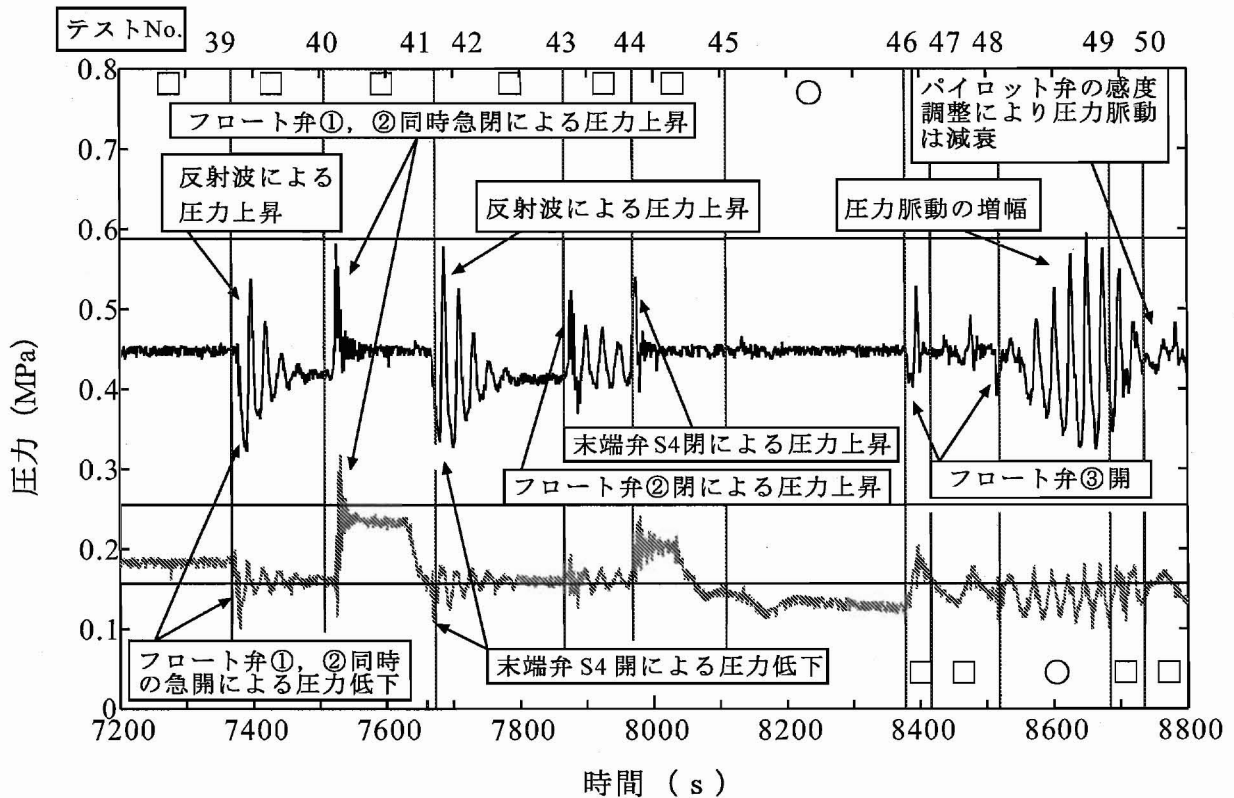


図 8: 実験結果 (テスト NO.38~50)

これは、排泥弁 S1 を開操作した場合には、速やかに圧力変動が収束していることから、フロート弁と自動減圧弁との連成による自励振動が発生したものであると推察される。

- (3) 自動給水栓は、圃場の水面の高さが低下すると管路の分水口を押さえていたフロートが開いて、導水する機構になっており、フロートの 1, 2 次側の圧力の影響を受けてバルブが自動的に稼働する自動弁の一種である。従って、仕切弁を開操作すると大気解放状態となる排泥弁に比べて、自動減圧弁との連成による自励振動が発生しやすいと考えられる。

5.3 直動式定流量弁の連成振動

直動式定流量弁は支線 1, 2 に合計 2 台設置しており、仕切弁 S2, S3 や末端弁 S4, S5 の操作により、種々の稼働状況が想定されるので、以下に示すような条件を設定した。

5.3.1 通水停止から定流量弁 1 台を稼働した場合

テスト NO.10~11, 23~24: 通水停止から支線 1 の仕切弁 S2 を開いて、支線 1 の通水を開始して、直動式定流量弁 Q1 のみを機能させた場合であり、支線 1 の末端弁 S4 については、全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に絞った状態である。

圧力変動としては、支線 1 の通水開始に対する減圧弁の応答遅れから、一時的な圧力低下を生じ、その後、逆に大きな圧力上昇を生じている。

5.3.2 定流量弁 2 台稼働中に 1 台を停止した場合

- (1) テスト NO.15~16: 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 を全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に設定して、支線 1, 2 の通水を継続中に、支線 2 の末端弁 S5 を閉鎖し、直動式定流量弁 Q1 のみを機能させた場合であ

る。末端弁 S5 の操作直後には圧力変動が生じるが、時間の経過とともに減衰し、管路の圧力は一定値に収束する。

- (2) テスト NO.13~14: テスト NO.15~16 と同様の条件で操作したが、末端弁 S5 の操作直後に発生した圧力変動が減衰しないで継続している。

5.3.3 定流量弁 2 台を稼働した場合

支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 について、全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に絞った状態で、仕切弁 S2, S3 を閉鎖して、通水を停止している状態から、仕切弁を S2, S3 の順に解放して、2 台の直動式定流量弁 Q1, Q2 を Q1, Q2 の順に機能させた。

さらに、直動式定流量弁 Q2 については末端弁 S5 のバルブ開度を 1/5 流量相当開度から全開にし、さらに閉操作と開操作を繰り返す試験を行った。2 台稼働時の圧力変動については、テスト NO.11~13, 14~15, 16~17, 47~48, 50~ で検証しているが、振動現象が特徴的に現れたテスト NO.11~15 の結果を整理する。

- (1) テスト NO.11: 支線 1 を全開時流量の 1/5 流量に絞った状態で通水している状態から、支線 2 の仕切弁 S3 を全開した場合、支線 2 の通水が開始され、圧力が一時的に大きく変動するが、時間の経過とともに圧力変動は減衰し、徐々に周期が長くなって、圧力は一定値に収束している。

支線 2 の末端弁 S5 のバルブ開度は 1/5 流量相当開度に設定されているので、直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと推察される。

- (2) テスト NO.12: 支線 2 の末端弁 S5 のバルブ開度を 1/5 流量相当開度から全開に開けると、支線 2 の通水

量が直動式定流量弁 Q2 の設定流量程度まで増加することから、大きな圧力振動が発生し、その大きさは増加傾向を示している。

直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、定流量弁の作動機構が十分に機能して、自励振動を誘発する可能性があるものと推察される。

- (3) テスト NO.14：減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° に絞って、感度を少し鈍くするような調整を行うと、支線 2 の末端弁 S5 のバルブ開度を全開で使用した場合でも、初期の段階で生じた圧力変動が減衰する傾向を示している。
減圧弁の応答感度を鈍くすることで管路内圧力の自励振動を抑制できることを示している。

5.3.4 定流量弁 2 台稼働時の外乱に対する応答性

2 台の直動式定流量弁 Q1, Q2 を機能させた状態で、排泥弁 S1 またはフロート弁③を開操作した場合については、テスト NO.1~5, 46~47, 48~50 で検証している。

- (1) テスト NO.1~5: 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 について、全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に絞って通水を継続している状況で、排泥弁 S1 を開操作した時に、一時的に圧力変動が発生するが、速やかに収束している。
直動式定流量弁は、定流量機能が一部機能している状態では、大気解放型の分水工バルブを操作することにより発生する外乱に対して、過剰に応答しないため、問題となるような振動を発生していない。

- (2) テスト NO.46~47, 48~50: 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 について、全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に絞って通水を継続している状況で、減圧弁の上流に設置した自動給水栓③のフロート弁を開操作した時に、減圧弁の上流側で大きな圧力変動が発生し、時間の経過とともに振動が増幅している。
フロート弁は圧力の影響を受けて作動するため、減圧弁と連成して自励振動が発生したものと考えられる。

5.3.5 定流量弁 1 台稼働継続時

- (1) テスト NO.25~26, 27~28: 支線 2 の仕切弁 S3 を閉鎖し、支線 2 の通水を停止した状態で、支線 1 の末端弁 S4 を全開時流量の 1/5 流量に相当する開度に設定して、支線 1 の通水を行う。支線 1 の通水を継続中に、自動給水栓①のフロートを開閉する。フロート弁の開鎖直後から圧力の振動が発生し、約 30 秒の周期で振動し、減衰しないで継続している。
ただし、圧力振動の大きさは、減圧弁の上流側で安全弁の作動圧 0.6MPa に達しておらず、支線 1 の末端弁 S4 のバルブ開度が 1/5 流量相当開度に設定されていることから、直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと推察される。
- (2) テスト NO.36~37: 支線 2 の仕切弁 S3 を閉鎖し、支線 2 の通水を停止した状態で、支線 1 の末端弁 S4 のバルブ開度を全開に設定して、支線 1 の通水を行う。大きな圧力の振動が発生し、減圧弁上流側の 1 次圧力の最大値は、上流側安全弁の作動圧 0.6MPa に達している。

この大きな圧力振動が約 20 秒の周期で振動し、減衰しないで継続している。末端弁 S4 を全開状態にするため、直動式定流量弁を設定流量付近で使用することとなり、定流量弁の作動機構が十分に機能して、自励振動を誘発したのものと推察される。

表 3: 安全弁の稼働状況

テスト NO.	減圧弁の計測圧力		安全弁	
	1 次側 P1 (MPa)	2 次側 P2 (MPa)	1 次側 SF1	2 次側 SF2
9 - 10	0.69	0.27	●	●
10 - 11	0.68	0.26	●	
12 - 13	0.58	0.18		
20 - 21	0.60	0.27		●
23 - 24	0.69	0.28	●	
26 - 27	0.31	0.18		
27 - 28	0.62	0.21		
33 - 34	0.63	0.24		
35 - 36	0.60	0.29		●
36 - 37	0.60	0.18		
37 - 38	0.60	0.19		
39 - 40	0.55	0.31		
40 - 41	0.60	0.34		●
42 - 43	0.59	0.19		
48 - 49	0.60	0.18		

安全弁の作動状況 ●：作動して吐出
空白：作動していない

5.4 自動減圧弁の応答感度の調節効果

自動減圧弁のパイロット弁の開度を変化させて、応答感度を調節した場合については、テスト NO.1~5, 7~9, 12~16, 19~23, 24~28, 30~33, 36~38, 44~46, 48~50 で検証しているが、圧力変動の変化があった場合について以下に整理する。

- (1) テスト NO.1~5：減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° に絞ると、圧力変動の周期はほぼ同じであるが、振動の大きさが減少する傾向にある。
- (2) テスト NO.12~16：減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° に絞って、感度を少し鈍くするような調整を行うと、圧力変動が減衰する傾向を示している。
- (3) テスト NO.7~9, 19~23：支線 1, 2 の通水がないため、排泥弁 S1 のバルブ操作が管路に与える影響が少なく、減圧弁のパイロット弁の開度設定による応答感度の調整による圧力振動の変化が認められない。
- (4) テスト NO.24~28：減圧弁のパイロット弁の開度を 45° から全開にすると、圧力変動の周期はほぼ同じであるが、振動の大きさが異なる傾向にある。

- (5) テスト NO.30~33 : 減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 45° に絞った後に、50°、全開と増加させると、圧力変動の周期はほぼ同じであるが、振動の大きさが異なる傾向にある。パイロット弁の開度を 50° とした場合に圧力振動が最小となっている。
- (6) テスト NO.36~38 : 減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 50° に絞って、感度を少し鈍くするような調整を行うと、周期的に生じており、大きさが減少しなかった圧力変動が減衰する傾向を示している。
- (7) テスト NO.48~50 : 圧力振動の振幅が増加するような激しい圧力脈動が発生していたが、自動減圧弁のパイロット弁の開度を全開から 50° に変化させて、応答感度を鈍くしたところ、圧力振動が減衰し、やがて振動が収束した。

5.5 安全弁の効果

表 3 に減圧弁の前後に設置した安全弁が作動したテスト NO. とその時の減圧弁上下流の圧力を示す。安全弁の作動が管路圧力の変化に与える影響については、以下のよう整理できる。

- (1) テスト NO.9~10, 20~21 : 支線 1, 2 の仕切弁 S2, S3 を全閉して、支線の通水を停止した状態で、幹線の排泥弁 S1 を解放している状態から、排泥弁 S1 を閉鎖すると、テスト NO.9~10 では、減圧弁の 1, 2 次側とも非常に大きな圧力が発生し、安全弁が作動して、系外へ管路水を放出している。安全弁の作動後、排泥弁 S1 の閉鎖に伴い発生した圧力振動が徐々に減衰している。
テスト NO.20~21 では、減圧弁の 2 次側の安全弁が稼働するが、1 次側の圧力上昇が大きくないため、上流側の安全弁は稼働していない。
- (2) テスト NO.10~11, 23~24 : 通水停止から支線 1 の仕切弁 S2 を開いて、支線 1 の通水を開始して、直動式定流量弁 Q1 のみを機能させた場合である。通水開始時に減圧弁の応答遅れから、一時的な圧力低下を生じるが、その後、逆に大きな圧力上昇を減圧弁の 1 次側で生じ、上流側安全弁の作動後、圧力振動が徐々に減衰する傾向にある。
- (3) テスト NO.26~28, 33~36, 39~41 : 自動給水栓のフロート弁①, ②を閉鎖して、通水が停止した場合については、自動減圧弁の 2 次側圧力が上昇して、1 次側にも圧力上昇を発生させる。しかし、減圧弁の 2 次側の安全弁が作動するため、1 次側への圧力の伝播による圧力上昇は抑制されている。

6 まとめ

自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせたシステムについての安定性については、以下のように整理できる。

- (1) 通水停止時の圧力遮断性能 : 自動減圧弁を小さい開度で使用すると、弁体が全閉との往復を繰り返すチャタリングを生じ、通水の停止に伴う自動減圧弁の圧力振動が発生するが、時間の経過とともにその大きさが減少し、やがて収束する傾向にある。

- (2) 通水開始時の圧力制御性能 : フロート弁を用いる自動給水栓は、管路圧力の影響を受けてバルブが自動的に稼働するため、自動減圧弁との連成による自励振動が発生しやすいと考えられる。一方、排泥弁のように、仕切弁を開操作すると大気解放状態となる場合は、自動弁に比べて自励振動が発生しにくいと考えられる。
- (3) 直動式定流量弁の連成振動 : 直動式定流量弁を設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないが、設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性がある。
- (4) 自動減圧弁の応答感度の調節効果 : 減圧弁のパイロット弁の開度を調節して、応答感度を鈍くすることで管路内圧力の自励振動を抑制することが可能である。
- (5) 安全弁の効果 : 末端バルブの閉鎖や解放により、一時的に大きな圧力上昇を生じた場合でも、減圧弁の上下流側に設置した安全弁が作動することにより、圧力振動は徐々に減衰させることができる。

自動減圧弁の圧力制御機能および直動式定流量弁との連成振動については、現地実験の結果から推測することにより、概略の傾向は得られたと考えている。今後は、実験条件を絞り込むと同時により多くのデータを集積して、詳細な検討を加える必要がある。

謝辞 : 本研究を遂行するに当たり、京都大学大学院 三野徹教授に貴重なご指導とご助言を賜った。また、現地試験については、関係各位の多大な援助と協力を頂いた。なお、本研究は文部科学省科学研究費基盤 C(14560202) の支援によって行われた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 長 勝史・長 智男・黒田正治 (1987): 管路における減圧弁の動特性 (I), 農業土木学会論文集, 127, pp.43-50.
- [2] 長 勝史・長 智男・黒田正治 (1988): 管路における減圧弁の動特性 (II) - 自励振動発生現象とその発生機構 -, 農業土木学会論文集, 135, pp.91-98.
- [3] 藤井 澄二 (1952): 振動弁による流体柱の防振 (第 1 報), 日本機械学会論文集, 18(66), pp.182-184.
- [4] 畑地農業振興会・横田製作所 (1992): 可変定流量調整弁の性能と農業かんがいへの適用性, 畑地農業, 400, pp.2-9.
- [5] 稲垣仁根・國武昌人 (1996): 新型自動減圧弁による管路圧力の制御技術, 農業土木学会誌, 64(3), pp.57-62.
- [6] 稲垣仁根・小路順一・近藤文義 (1998): 新型自動減圧弁を直列配置した低圧化パイプラインシステムのシミュレーション, 農業土木学会論文集, 196, pp.23-39.
- [7] 稲垣仁根・小倉邦雄・角田範明・近藤文義 (1999a): 安全弁による低圧化パイプラインシステムの水撃圧対策, 農業土木学会論文集, 200, pp.93-103.
- [8] 稲垣仁根・小倉邦雄・寺川吉博・近藤文義 (1999b): 可変式定流量弁を用いたパイプライン流量チェックシステムのシミュレーション, 農業土木学会論文集, 203, pp.67-76.
- [9] 日本機械学会 (2003): 事例に学ぶ流体関連振動, 技報堂, pp.220-226.
- [10] 農業土木事業協会 (2000a): かんがいパイプライン機器便覧, pp.122-123.
- [11] 農業土木事業協会 (2000b): かんがいパイプライン機器便覧, pp.128-131.

- [12] 農業土木事業協会 (2000c):かんがいパイプライン機器便覧, pp.266-267.
- [13] 農林水産省構造改善局 (1988): 土地改良事業標準設計 第4編パイプライン (解説書), pp.436-439.
- [14] 農林水産省構造改善局 (1998a): 土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」, pp.368-369.
- [15] 農林水産省構造改善局 (1998b): 土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」, pp.377-378.
- [16] 斎藤正樹・稲垣仁根 (1996): 自動減圧弁によるパイプラインの低圧化システムと現地計測, 農業土木学会論文集, 183, pp.129-141.
- [17] 斎藤正樹・稲垣仁根 (1997): 自動減圧弁による低圧化パイプラインの実測とシミュレーション, 農業土木学会論文集, 187, pp.111-122.
- [18] 谷口 修 (1976): 振動工学ハンドブック, 養賢堂, pp.1067-1071.

セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (II)

—定流量弁の作動による振動発生—

稲垣仁根¹・斎藤正樹²・奈良大和³・中園健文¹・秋吉康弘⁴

Studies on self-induced vibration of automatic pressure regulator and constant flow valve in the semi closed pipeline(II)

— The oscillatory excitation by the actuation of the constant flow valve —

Hitone Inagaki¹, Masaki Saito², Yamato Nara³, Takefumi Nakazono¹
and Yasuhiro Akiyoshi⁴

1 はじめに

農業用パイプラインシステムの規模と水管理の最適化を目指して自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入が要請されている。このパイプラインは、圧力の高くなりがちな末端側において、自動減圧弁により過剰な圧力を削減して塩化ビニル管の使用を可能とし、さらに支線管路の途中に配置した自動定流量弁により末端側での過剰な分水操作の影響を排除できることに特徴がある。しかし、自動減圧弁と直動式の自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインを導入した地区において、自動減圧弁が過剰に開閉し、これが収束しないで大きな圧力変動が長時間継続した事例が発生している。

著者らは、自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせて使用したシステムについて、現地での実証試験を実施して、現場で発生した現象を再現し、自動減圧弁単独あるいは直動式定流量弁との併用による自励振動の発生状況を検証した(稲垣ら, 2004)。その結果、自動減圧弁についての通水停止時の圧力遮断性能と通水開始時の圧力制御性能に関して種々の知見が得られたが、直動式定流量弁などの自動弁との連成振動については、以下に示すような知見が得られた。

(1) フロート弁の連成振動: フロート弁を用いる自動給水栓は、管路圧力の影響を受けてバルブが自動的に稼働するため、自動減圧弁との連成による自励振動が発生しやすいと考えられる。

(2) 直動式定流量弁の連成振動: 直動式定流量弁を設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないが、設定流量付近で使用する場合は、

管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性がある。

(3) 自動減圧弁の応答感度の調節効果: 長ら(1987, 1988)が指摘するように、管路内に自励振動が発生している場合の対策としては、自動減圧弁のパイロット弁の開度を調節して、応答感度を鈍くすることで管路内圧力の自励振動をある程度抑制することが可能である。

本稿では、自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動の発生について条件を絞って現地試験を行い、定流量弁の機能発現と自励振動の発生の関係について検討を行った。なお、自動減圧弁を用いたパイプライン、定流量弁を用いた流量制御システムなどについては、既報(稲垣ら, 2004)に記述しているので参照されたい。

2 自動減圧弁の作動機構

図1に新型の自動減圧弁の作動機構の概要図を示すが、減圧弁上下流の管路圧力を細管で取り出し、2次圧を一定にするように外部のパイロット弁で弁体を駆動する方式である(農業土木事業協会 2000a)。実際の2次圧が設定圧より大きければ、1次側圧力を弁体上部に作動させて、閉方向に駆動し、2次圧が設定圧より小さい時には、2次側圧力を弁体上部に作動させて、開方向に駆動することに特徴がある。2次圧が設定圧力付近にあり安定している状態では、弁体上部にはパイロット弁内で1, 2次圧が混合された圧力が作用している。

通常の応答速度の調節は、減圧弁上流側の圧力取出細管に設置したバルブAの開度を変化させて、パイロット弁に導入する1次圧の大きさを調節することにより行う。バルブAを開けば、管路の1次圧がそのまま導入されるので、応答速度は速くなるが、バルブAを絞ればパイロット弁に導入される1次圧が管路圧力より小さくなるので応答速度が遅くなる。

減圧弁のパイロット弁の開度を調節して、応答感度を鈍くすることで管路内圧力の自励振動を抑制することが可能であるので、本稿では、減圧弁の下流側の圧力取出細管にもバルブBを設置して、パイロット弁への減圧弁

¹宮崎大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki Univ

²クラウンエンジニアリング(株) 副社長 Vice President, Crown Engineering CO., LTD

³クラウンエンジニアリング(株) 技師 Engineer, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

⁴宮崎大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1

上下流の導入圧力を調節する方法を採用した。このバルブ A、B の開度は、現地で調節する必要があり、通常は全開に設定しておき、段階的に開度を絞って、減圧弁の応答が安定する開度を見つける方式で対応している。

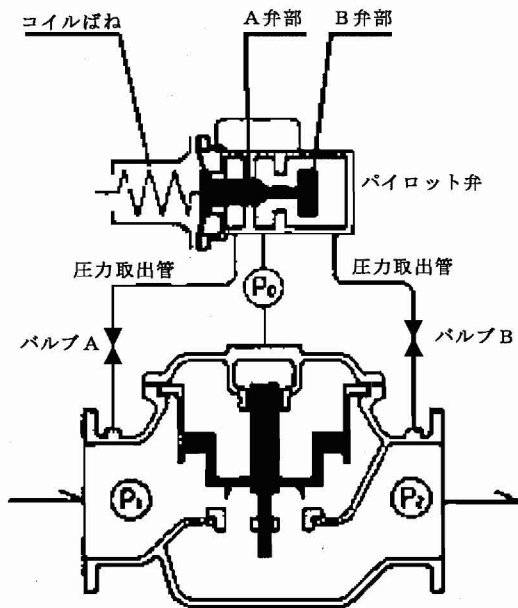


図 1: 自動減圧弁の作動機構

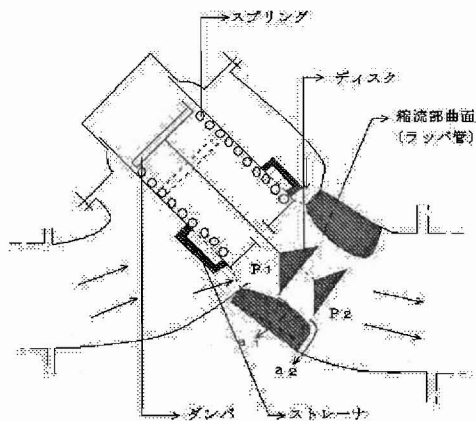


図 2: 直動式定流量弁の作動機構

2.1 直動式定流量弁の作動機構

実験で使用した定流量弁は、管路の中にバネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁（農業土木事業協会 2000b）であり、この直動式は内部の流量調整管を選択する固定式である。図 2 に直動式定流量弁の作動機構の概要図を示すが、バネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁は、弁体前後の圧力差が大きくなると、弁体が閉方向に移動して、通水断面積を減少させる。

従って、弁を上流の圧力が上昇すると流速が減少するような機構となっているため、管路の圧力波動と弁振動が連成して、自励振動が発生する可能性がある。さらに、直動式定流量弁を自動減圧弁と組み合わせて使用する場合は、自励振動の発生しやすい要因を内包する自動弁を直列に繋ぐことになるので、複数の自動弁の連成による自励振動の発生の可能性を考慮する必要がある。

3 実証パイプラインの概要

現地実証試験を行ったパイプラインは、図 3 のパイプライン縦断面図に示すように、水源を貯水池とする延長約 1.7km、計画流量 $0.0926\text{m}^3/\text{s}$ の自然流下パイプラインである。水源貯水池の水位は、HWL 170.6m、LWL 161.6m であり、通常の管理水位は NWL 167.4m である。

さらに、貯水池より約 900m の地点で自動減圧弁により静水位 NWL 167.4m から約 28m 減圧して、減圧弁下流の制御水位を WL 139.0m とする 1 段減圧方式を採用している。なお、幹線末端の仕切弁 S6 は、実験中は常に閉鎖している。

また、貯水池から 1.1km と 1.3km の地点で幹線から支線へ分岐し、分岐した支線側に直動式定流量弁 Q1、Q2 が設置されている。従って、支線末端に設置した末端弁 S4、S5 を操作した場合、支線の途中に設置した直動式定流量弁により、幹線からの分水量が規制され、過剰な分水量が防止できるシステムとなっている。

付帯施設として、減圧弁の上流にフロート弁を用いた自動給水栓③を設置している。制水弁として幹線に仕切弁 S3 を、支線に仕切弁 S2 を設置している。さらに、自動減圧弁の上下流側には、過剰な圧力を管路から放出するために、安全弁 SF1、SF2 を設置している。

減圧弁と安全弁の作動圧力および定流量弁の設定流量は表 1 に示すように設定している。その他の仕切弁、自動給水栓のフロート弁、末端弁の口径については、表 2 に示している。自動給水栓は、圃場の水面の高さが低下すると管路の分水口を押さえていたフロートが開いて、導水する機構になっている（農業土木事業協会 2000c）。

4 実証試験の内容

実証試験の内容は、表 2 の実証試験の条件一覧表に示すが、左端の欄のテスト NO. は、実験の内容毎の区切りを示しており、計測結果を時系列的に図示した図 4～9 において、縦線と番号の組み合わせで区分の境を示している。

実験は、テスト NO.1～20 に分かれており、主に直動式定流量弁の自動減圧弁との連成振動の発生と自動減圧弁のパイロット弁のバルブ開度の調節による応答感度の調整効果について、検証を行った。実験の概要は以下に示すとおりである。なお、支線 1、2 の仕切弁 S2、S3 は、実験中は全開しておき、流量の調整は末端弁 S4、S5 により行った。

- (1) テスト NO.1～3：通水を停止している状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開して、定流量弁 Q1 を稼働させ、その後、末端弁 S4 を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A、下流のバルブ B とも全開に設定している。
- (2) テスト NO.3～6：通水を停止している状態から、支線 2 の末端弁 S5 を全開して、定流量弁 Q2 を稼働させ、その後、末端弁 S5 を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A、下流のバルブ B とも全開から 60° に時間をずらして変化させた。
- (3) テスト NO.6～9：通水を停止している状態から、幹線の自動給水栓③のフロート弁を全開した後、フロート弁を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A、下流のバルブ B とも 60° に設定している。

表 1: 減圧弁と安全弁の設定圧力

機種	口径 mm	管心高 EL.m	HWL EL.m	余裕高 m	作動圧力標高 EL.m	作動圧力 MPa	設定流量 m ³ /s
安全弁 (上流) SF1	50	124.0	170.6	20.0	182.6	0.598	
自動減圧弁	200	124.0	139.0	0.0	139.0	0.153	
安全弁 (下流) SF2	40	124.0	139.0	10.0	149.0	0.255	
直動式定流量弁 Q1	125	115.0				0.06~0.6	0.0185
直動式定流量弁 Q2	125	114.0				0.06~0.6	0.0185

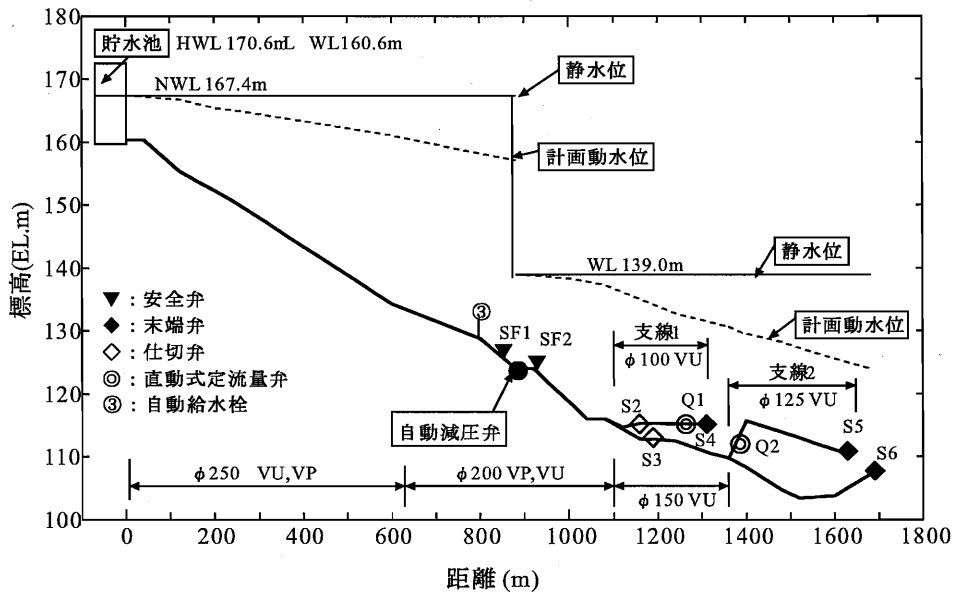


図 3: 実験パイプライン縦断面図

- (4) テスト NO.8~12: 通水を停止している状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開して、定流量弁 Q1 を稼働させ、その後、末端弁 S4 を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A を全開、下流のバルブ B は全開から 45° に変更している。
- (5) テスト NO.12~15: 通水を停止している状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開して、定流量弁 Q1 を稼働させ、その後、末端弁 S4 を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A を全開、下流のバルブ B は 45° に設定している。
- (6) テスト NO.14~17: 通水を停止している状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開時流量の 1/5 程度の分水量になるように絞り気味に開いた状態とし、その後、末端弁 S4 を閉鎖して通水を停止した。自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A を全開、下流のバルブ B は 45° に設定している。
- (7) テスト NO.16~19: テスト NO.12~15 と同じ操作を行う。
- (8) テスト NO.18~20: テスト NO.14~17 と同じ操作を行う。

5 実験結果

自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動の発生について、特に、定流量弁の機能発現と自励振動の発生の関係

について、実験結果を検証した。

5.1 自動減圧弁による圧力振動の拡大

- (1) テスト NO.1~11 において、通水を停止した状態から、支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 のどちらかを全開して、支線に設置した直動式定流量弁を稼働させ、その後、全閉する操作を繰り返した。通水開始直後から、約 25 秒を 1 サイクルとする周期的な振動が発生している。
- (2) 圧力振動の大きさは、テスト NO.1~10 において、減圧弁の 2 次側が最小が約 0.06MPa、最大が 0.21MPa 程度となっており、下流側安全弁による放流は発生していない。また、減圧弁の 1 次側の圧力は、最小が約 0.26MPa、最大が約 0.64MPa 程度となっており、上流側安全弁による放流は、断続的に発生している。
- (3) 圧力振動の振幅を減圧弁の上下流で比較すると、テスト NO.1~10 において、上流側が 0.38MPa、下流側が 0.15MPa と上流側の 40% になっている。さらに、テスト NO.10~11 において、自動減圧弁のパイロット弁の感度を調節したために、下流側の圧力振動の振幅が増加し、上流側の振幅が減少しているが、下流側の振幅が上流側より小さくなっている。
- (4) また、自動減圧弁が 2 次側圧力のピークが 1 次側圧力のピークの直前に生じており、これらのことを総合すると、自動減圧弁が 2 次側圧力の変化に反応し

表 1: 実験内容とバルブ操作条件

テスト NO.	幹線		支線 1		支線 2		
	1次側 フロート弁③ (φ 75)	自動減圧弁 (φ 200) パイロット弁のバルブ		仕切弁 (φ 150) S2	末端弁 (φ 100) S4	仕切弁 (φ 150) S3	末端弁 (φ 125) S5
		A (上流)	B (下流)				
		○全開	○	●		●	
1 - 2		○	○	●	●	●	
2 - 3		○	○	●		●	
3 - 4		○	○	●		●	●
4 - 5		○	□ 60°	●		●	●
5 - 6		□	□	●		●	●
6 - 7		□	□	●		●	
7 - 8	●	□	□	●		●	
8 - 9		○	○	●		●	
9 - 10		○	○	●	●	●	
10 - 11		○	△ 45°	●	●	●	
11 - 12		○	△	●		●	
12 - 13		○	△	●		●	
13 - 14		○	△	●	●	●	
14 - 15		○	△	●		●	
15 - 16		○	△	●	▲	●	
16 - 17		○	△	●		●	
17 - 18		○	△	●	●	●	
18 - 19		○	△	●		●	
19 - 20		○	△	●	▲	●	
20 -		○	△	●	●	●	

バルブ操作の凡例 ● : 全開, 空白 : 全閉, ▲ : 全開時流量の 1/5 流量に相当する開度

て、2次圧を一定に制御するように作動したことにより、減圧弁が2次側の圧力振動を増幅して1次側へ伝播させたものと考えられる。

- (5) 自動減圧弁を2次側圧力の変化に敏感に反応するようにパイロット弁のバルブ開度を全開にして、応答感度を鋭敏に設定すると、弁の作動が速くなるため、減圧弁がアンプの役割を果たして、2次側の圧力振動を増幅して1次側へ大きな圧力波を伝播させる要因なる可能性がある。

5.2 自動減圧弁の応答感度の調節効果

- (1) テスト NO.4~6 : 支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 のどちらかを全開して、直動式定流量弁を稼働させた状態で、自動減圧弁のパイロット弁の開度を、上流のバルブ A と下流のバルブ B とも全開から 60° に時間をずらして変化させた。

パイロット弁のバルブ B の開度を絞る毎に、2次側圧力の圧力振動の振幅が増加し、上流側の振幅が減少している。これは、自動減圧弁の応答速度を鈍くしたために、応答遅れにより2次側圧力の圧力振動が増加したものであると考えられる。

しかし、自動減圧弁の応答速度が遅いことから、パイロット弁のバルブ A, B を全開したテスト NO.1~2, 3~4 に比べて、減圧弁1次側における圧力振動の振幅の大きさは減少している。

- (2) テスト NO.10~11 : 支線 1 の末端弁 S4 を全開して、直動式定流量弁 Q1 を稼働させた状態で、自動減圧弁

のパイロット弁の開度を、上流のバルブ A は全開のまま、下流のバルブ B を全開から 45° に変化させた。圧力振動の大きさは、減圧弁の2次側が最小が約 0.02MPa, 最大が 0.31MPa 程度となっており、減圧弁の1次側の圧力は、最小が約 0.32MPa, 最大が約 0.64MPa 程度となっている。従って、上流側および下流側安全弁による放流は、断続的に発生している。圧力振動の振幅を減圧弁の上下流で比較すると、上流側が 0.32MPa, 下流側が 0.29MPa と上流側の 90% になっている。従って、自動減圧弁のパイロット弁の感度をバルブ A, B とも 60° に設定したテスト NO.4~6 に比較して、上流側の振幅には大きな違いはないが、下流側は約 2 倍に増加している。これは、パイロット弁の上流バルブ A は全開のままとし、下流のバルブ B の開度をを 45° まで絞ったために、減圧弁の感度が低下して、応答遅れにより2次側圧力の圧力振幅が大幅に増加したものであると考えられる。

一方、減圧弁1次側における圧力振動の振幅の大きさは、自動減圧弁のパイロット弁のバルブ A を 60° まで絞ったテスト NO.4~6 に比べて、大きな違いはない。従って、上流側バルブ A の開度調節による1次側圧力の感度は、下流側バルブ B に比べて鈍感であると考えられる。

- (3) 減圧弁の1次側への圧力伝播を防止するために、2次側に対する応答速度を遅くすることはある程度有効であるが、応答遅れにより2次側圧力の圧力振動が

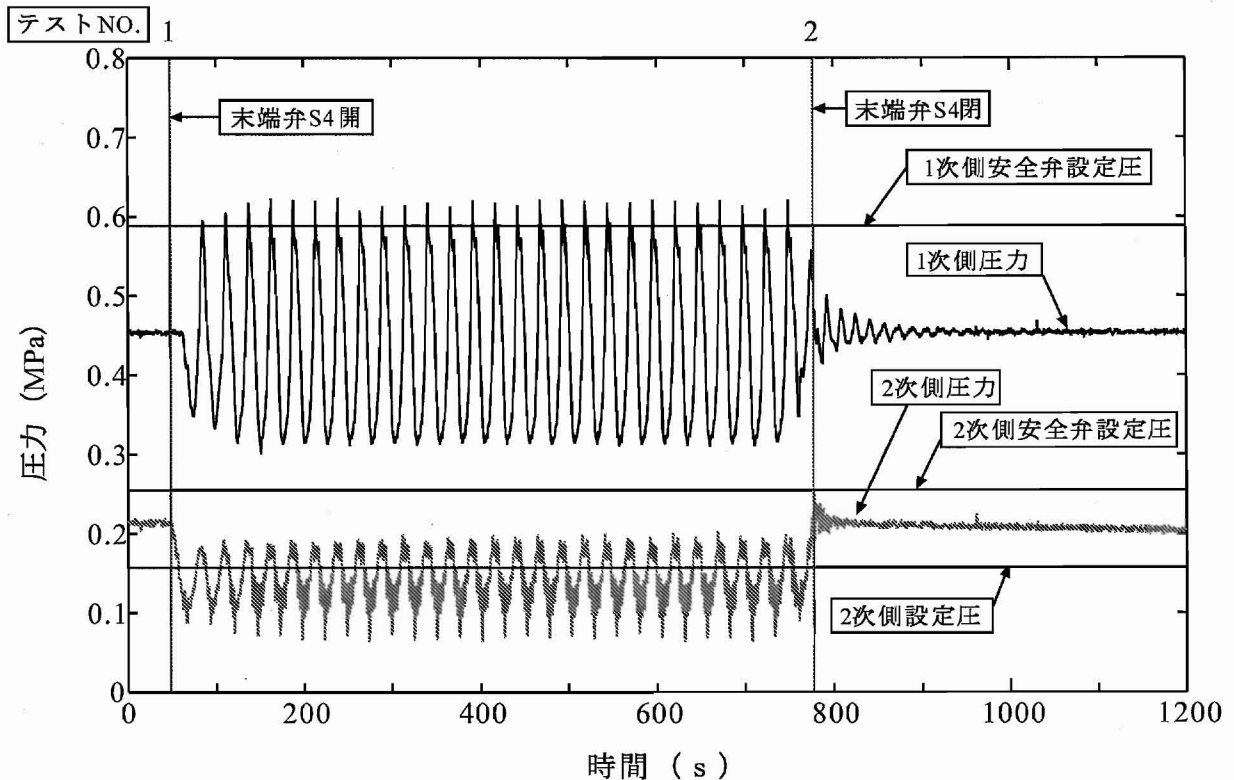


図 4: 減圧弁 1, 2次側圧力 (テスト NO.1~3)

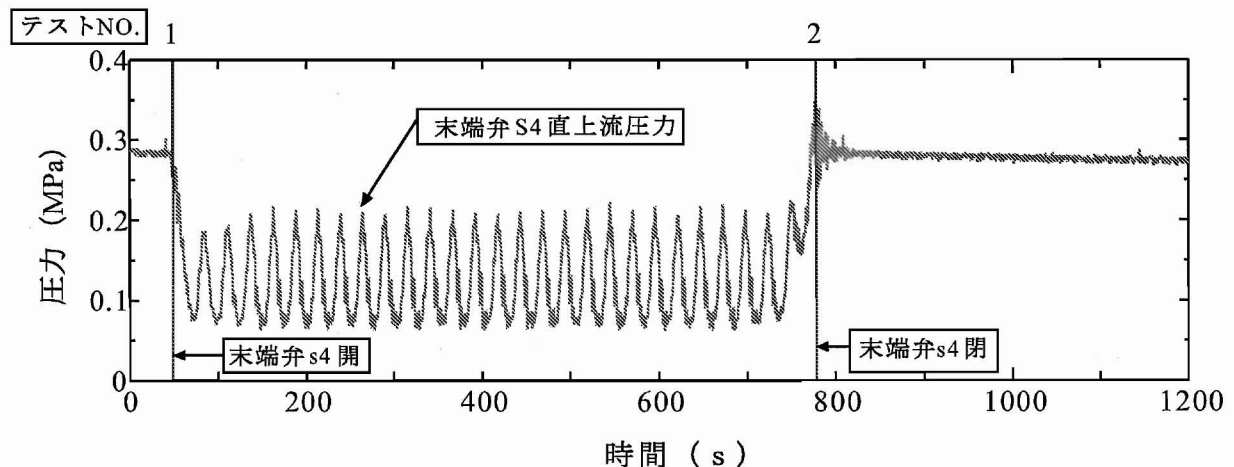


図 5: 末端弁 S4 直上流圧力 (テスト NO.1~3)

増加するものと考えられる。従って、減圧弁を用いた管路における圧力の自励振動の発生は、減圧弁の応答感度を鈍くすることのみでは、完全に抑制できないと判断される。

5.3 直動式定流量弁の連成振動

(1) テスト NO.1~2: 通水を停止した状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開して、直動式定流量弁 Q1 を稼働させ、その後、末端弁 S4 を全閉する操作を行った。図 5 に末端弁 4 の直上流の圧力変動を示すが、通水開始直後から約 25 秒を 1 サイクルとする周期的な振動が発生している。

圧力振動の大きさは、最小が約 0.05MPa、最大が 0.22MPa 程度となっており、振幅は 0.17MPa であるので、減圧弁の 2 次側の圧力振幅の 0.15MPa より大きくなっている。

(2) テスト NO.3~4: 通水を停止した状態から、支線 2 の末端弁 S5 を全開して、直動式定流量弁 Q2 を稼働させ、その後、末端弁 S5 を全閉する操作を行った。図 7 に末端弁 4 の直上流の圧力変動を示すが、通水開始直後から約 25 秒を 1 サイクルとする周期的な振動が発生している。

圧力振動の大きさは、最小が約 0.11MPa、最大が 0.33MPa 程度となっており、振幅は 0.22MPa であるので、減圧弁の 2 次側の圧力振幅の 0.15MPa より大きくなっている。圧力の計測地点が、通水する末端弁 S5 ではないが、定流量弁に近い末端側の圧力振動を捉えていると考えられる。

(3) 通水を停止した状態から、支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 のどちらかを全開して、支線に設置した直動式定流量弁 Q1, Q2 を稼働させる場合、定流量弁を設置し

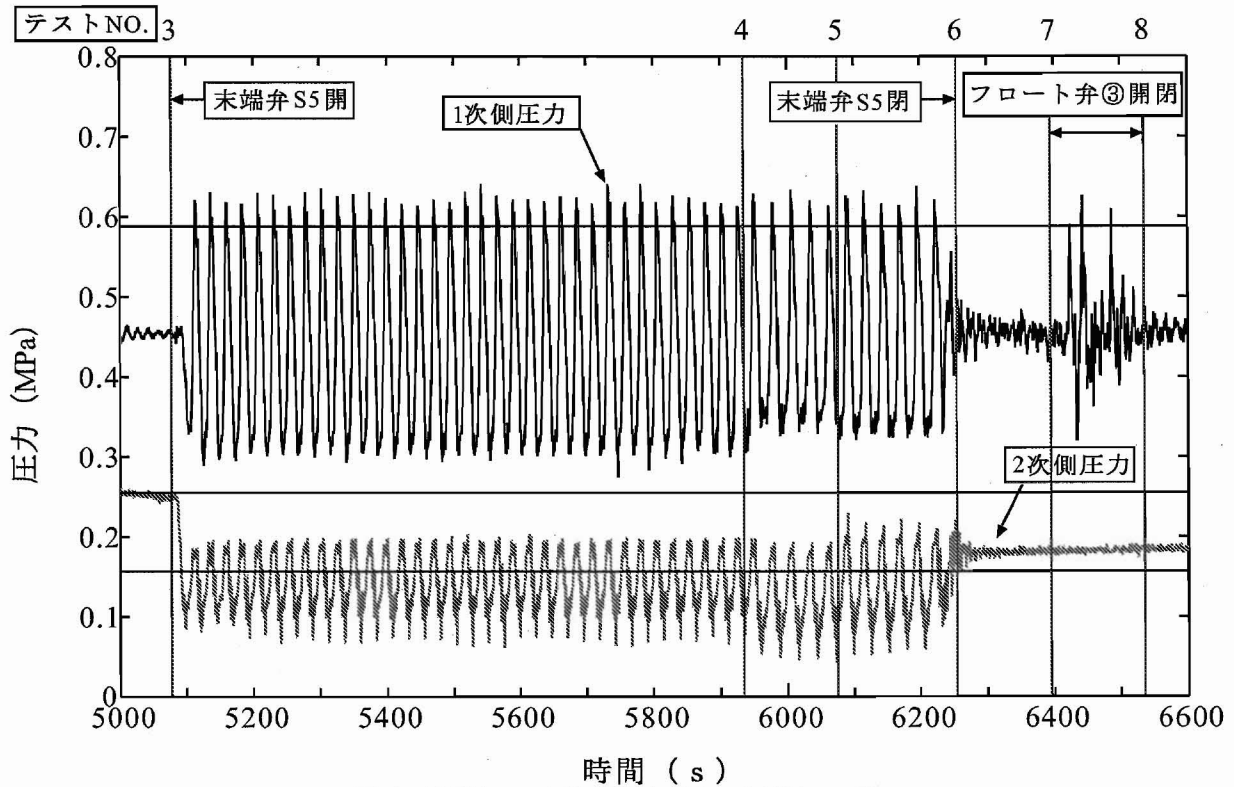


図 6: 減圧弁 1, 2次側圧力 (テスト NO.1~3)

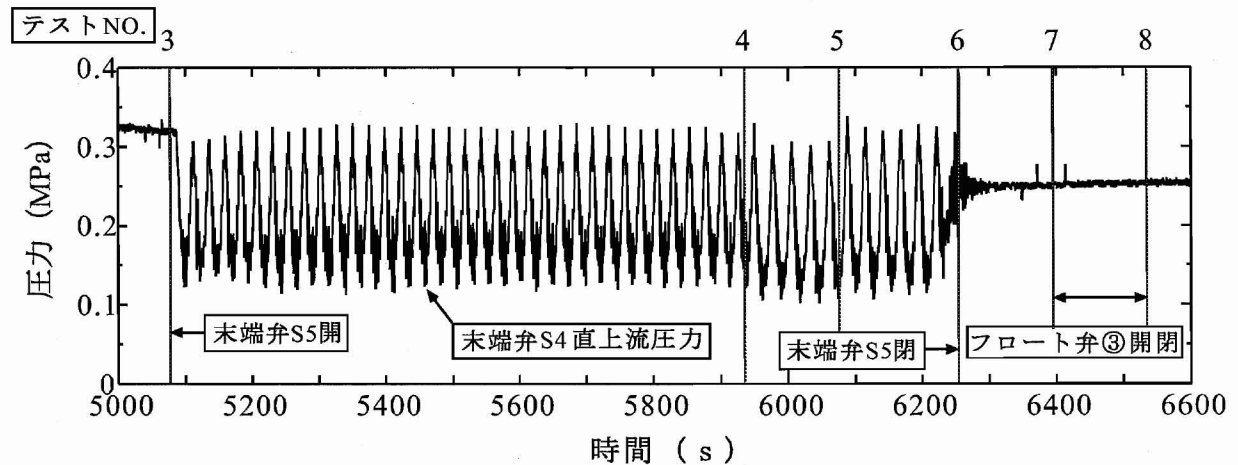


図 7: 末端弁 S4 直上流圧力 (テスト NO.3~8)

た末端側において、減圧弁の2次側の圧力振動より大きな振動が発生している。

- (4) 図 10 にテスト NO:3~4 の 5600~5614s 間における減圧弁上下流と末端弁 4 の直上流の圧力標高を 0.5s 間隔で○を用いて示している。14s 間で末端弁 4 の直上流の圧力標高が、最低から最高まで上昇するのに対応して、減圧弁上下流の圧力が上昇する過程を、5601, 5607, 5614s の圧力標高縦断線で示している。圧力の上昇の大部分は、14s 間の後半で生じていることが、○の密集度からも理解できる。さらに、末端弁 4 に対して減圧弁の圧力上昇が遅れることが、5600s の圧力縦断線からわかる。

図 10 より末端側で発生した圧力上昇が管路の摩擦により減衰しながら上流へ伝播し、減圧弁地点で反射し、圧力低下となって末端側に現れたようすが理解

できる。また、減圧弁地点に到達した圧力波は、一部が上流側へ透過し、2次側圧力の変化となって現れている。さらに、この2次側の圧力振動に減圧弁が敏感に反応して、振幅を増幅して、大きな圧力振動を発生させ、上流側へ伝播させたものと考えられる。

5.4 直動式定流量弁の機能制限

- (1) テスト NO.13~14, 17~18: 支線 1 の末端弁 S4 を全開して、直動式定流量弁 Q1 を稼働させた状態で、自動減圧弁のパイロット弁の開度を、上流のバルブ A は全開のまま、下流のバルブ B を 45° に設定している。減圧弁の2次側に対する応答速度を遅くすることで、減圧弁の1次側への圧力伝播をある程度防止することが出来ているので、1次側の圧力振動は2次側より小さく抑えられている。しかし、減圧弁の応答遅れにより2次側圧力の圧力振動は増加するもの

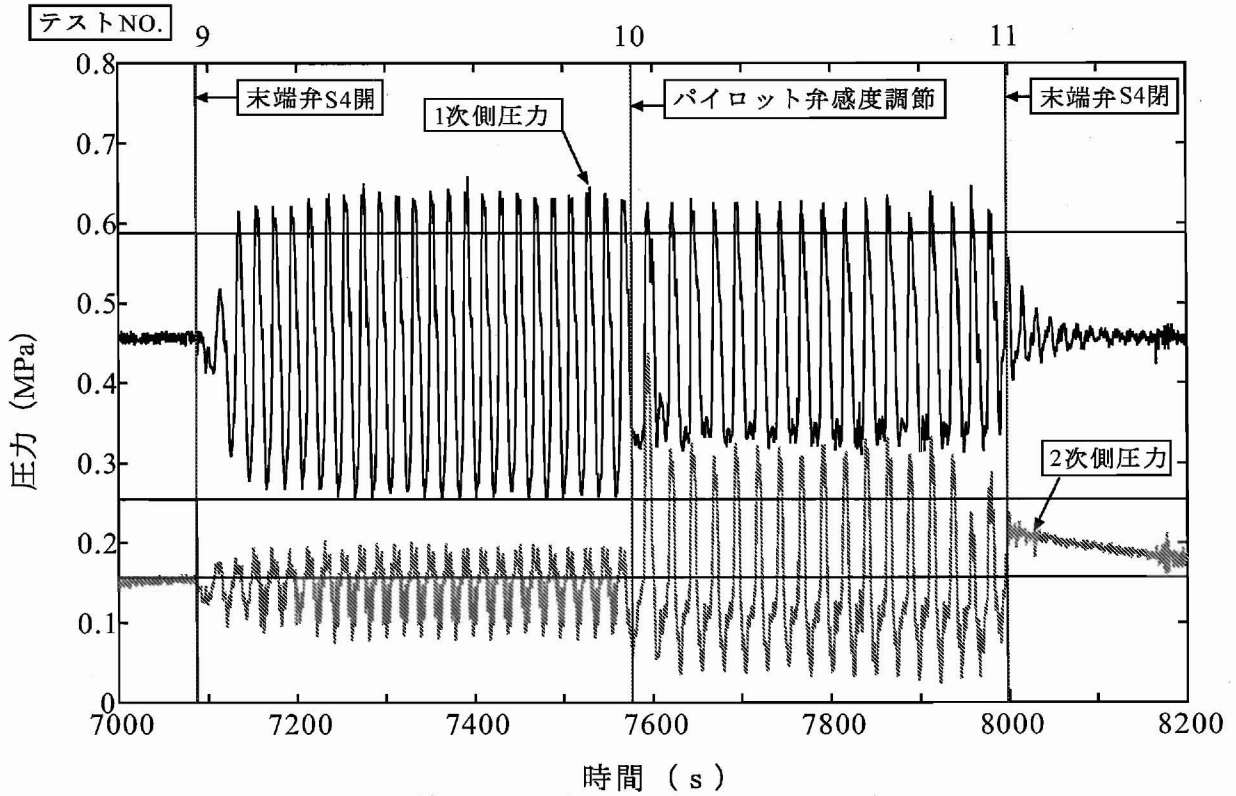


図 8: 減圧弁 1, 2次側圧力 (テスト NO.9~12)

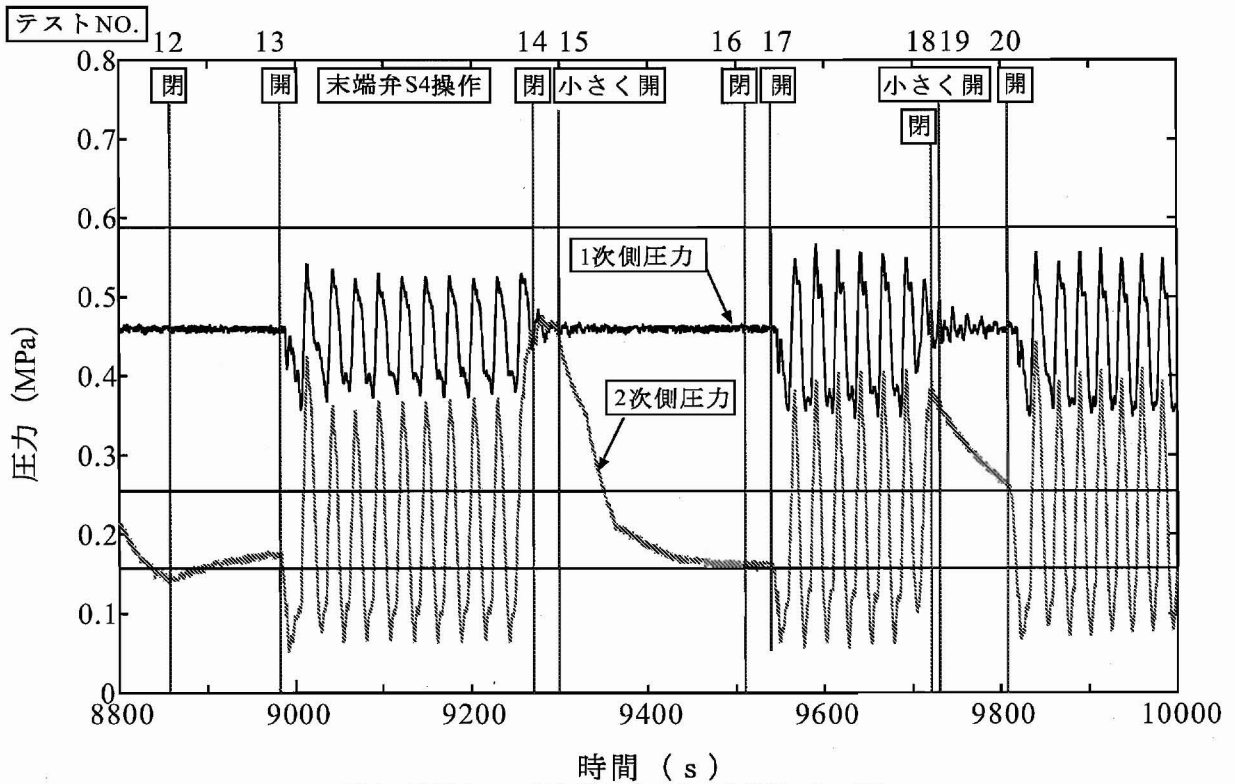


図 9: 減圧弁 1, 2次側圧力 (テスト NO.12~20)

と考えられる。
従って、直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性があると考え

られる。
(2) テスト NO.14~15, 18~19: 自動減圧弁のパイロット弁の開度は、上流のバルブ A を全開、下流のバルブ B は 45° に設定しているため、2次側圧力に対す

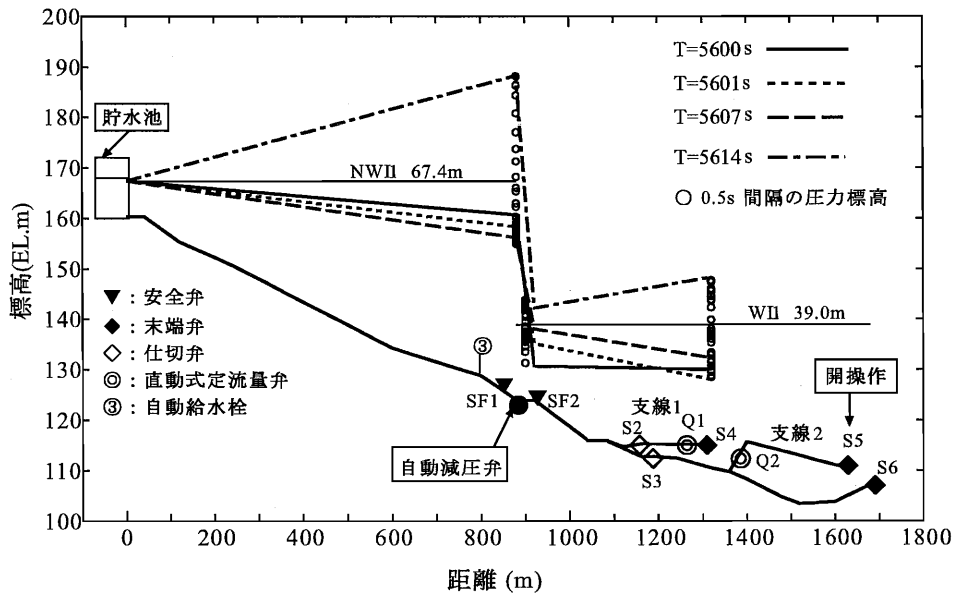


図 10: 圧力標高縦断図 (5600~5614s)

る応答速度が遅く、通水を停止する時の 2 次圧上昇に減圧弁の圧力制御が追従できずに、2 次側圧力の上昇を招いている。特に、テスト NO.14~15 では、2 次圧が 1 次圧まで上昇して、減圧弁の上下流の圧力が連続する事態を生じており、減圧弁の 2 次圧制御が機能しない結果となっている。

- (3) テスト NO.15~16, 19~20 において、通水を停止している状態から、支線 1 の末端弁 S4 を全開時流量の 1/5 程度の分水量になるように絞りに開いた状態とした。そのため、直動式定流量弁 Q1 は、十分な定流量機能が作動せず、減圧弁の 2 次側圧力は徐々に低下している。

従って、直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと推察される。

5.5 フロート弁の連成振動

- (1) テスト NO.7~8 において、通水を停止した状態から、幹線の自動給水栓のフロート弁③を開操作した場合は、自動減圧弁の上流側に大きな圧力振動が発生している。この時は、支線 1, 2 の末端弁 S4, S5 は閉鎖しているので、分水は自動給水栓③のみで行われている。従って、減圧弁の 2 次側圧力は、通水が停止していたテスト NO.6~7 と同じ大きさであり、設定圧より少し大きい圧力の状態が維持されている。
- (2) 減圧弁の上流側に設置した自動給水栓③のフロート弁のみを稼働しても、圧力振動が発生したことは、弁と管路が接続されたシステムにおいて、弁の動特性が自励振動に対して安定であっても、弁と管路内の流体とが連成した激しい自励振動が発生する場合があることを示している。
- (3) 自動給水栓は、圃場の水面の高さが低下すると管路の分水口を押さえていたフロートが開いて、導水する機構になっており、フロートの 1, 2 次側の圧力の影響を受けてバルブが自動的に稼働する自動弁の一

種である。従って、仕切弁を開操作すると大気解放状態となる排泥弁に比べて、自動減圧弁との連成による自励振動が発生しやすいと考えられる。

5.6 安全弁による抑制効果

- (1) 自動減圧弁の上下流側に安全弁を設置して、1, 2 次圧が設定圧より大きくなった場合に過剰な圧力を系外に放出して、圧力の増加と伝播を抑制する対策を講じている。テスト NO.1~2, 3~6, 9~11 において、圧力振動による 1 次圧の上昇に対応して、安全弁が作動しているが、その効果はあまり認められない。
- (2) また、テスト NO.10~11, 13~14, 17~18 において、圧力振動による 2 次圧の上昇に対応して、安全弁が作動しているが、その効果はあまり認められない。
- (3) 圧力脈動の大きさに比べて、安全弁の規模が小さい場合は、抑制効果が期待できないことが指摘されている (三野, 1975; 稲垣ら, 1999)。本実験においても、安全弁が圧力振動に反応して断続的に作動したものの、圧力上昇分をカットするだけの能力を有していないため、圧力振動が減衰しない結果になったと推察される。

6 まとめ

自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせたシステムについての安定性については、以下のように整理できる。

- (1) **直動式定流量弁の連成振動**：直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性がある。
直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと推察される。
- (2) **自動減圧弁の応答感度の調節効果**：減圧弁の 1 次側への圧力伝播を防止するために、2 次側に対する応答

速度を遅くすることはある程度有効であるが、応答遅れにより 2 次側圧力の圧力振動が増加するものと考えられる。従って、減圧弁を用いた管路における圧力の自励振動の発生は、減圧弁の応答感度を鈍くすることのみでは、完全に抑制できないと判断される。2 次側圧力に対する応答速度を遅く設定すると、通水を停止する時の 2 次圧上昇に減圧弁の圧力制御が追従できずに、2 次側圧力の過剰な上昇を招く可能性がある。

2 次側圧力に対する応答速度を速く設定すると、2 次側の圧力振動に減圧弁が敏感に反応して、振幅を増幅し、大きな圧力振動を上流側へ伝播させる可能性がある。

- (3) フロート弁の連成振動：自動給水栓のようにフロート弁を用いたバルブは、圧力の影響を受けて作動するため、減圧弁と連成して自励振動が発生する可能性がある。
- (4) 安全弁による抑制効果自動減圧弁の上下流側に設置した安全弁の規模が小さい場合は、安全弁が自動弁の連成振動に起因する圧力振動に反応して断続的に作動しても、圧力振動が減衰しないと考えられる。

自動減圧弁の圧力制御機能および直動式定流量弁との連成振動については、既報（稲垣ら 2004）と合わせて、現地実験の結果から発生条件と抑制対策についての方向性は得られたと考えている。今後は、自動弁の連成振動に対する対策について、検討を加える必要がある。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、京都大学大学院 三野徹教授に貴重なご指導とご助言を賜った。また、現地試験については、関係各位の多大な援助と協力を頂いた。なお、本研究は文部科学省科学研究費基盤 C(14560202)の支援によって行われた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 長 勝史・長 智男・黒田正治 (1987): 管路における減圧弁の動特性 (I), 農業土木学会論文集, 127, pp.43-50.
- [2] 長 勝史・長 智男・黒田正治 (1988): 管路における減圧弁の動特性 (II) - 自励振動発生現象とその発生機構 -, 農業土木学会論文集, 135, pp.91-98.
- [3] 稲垣仁根・小倉邦雄・角田範明・近藤文義 (1999): 安全弁による低圧化パイプラインシステムの水撃圧対策, 農業土木学会論文集, 200, pp.93-103.
- [4] 稲垣仁根・斎藤正樹・奈良大和・竹下伸一・秋吉康弘 (2004): セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (I)-圧力制御機能の実験的検証-, 雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [5] 三野 徹 (1975): 急傾斜地に設けられたパイプライン中に発生するウォーターハンマー, 農業土木学会誌, 43(12), pp.11-20.
- [6] 農業土木事業協会 (2000a):かながいパイプライン機器便覧, pp.162-165.
- [7] 農業土木事業協会 (2000b):かながいパイプライン機器便覧, pp.122-123.
- [8] 農業土木事業協会 (2000c):かながいパイプライン機器便覧, pp.266-267.

セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (III)

—サージステッキによる振動の抑制効果—

稲垣仁根¹・斎藤正樹²・奈良大和³・中園健文¹・秋吉康弘⁴

Studies on self-induced vibration of automatic pressure regulator and constant flow valve in the semi closed pipeline(III)

— The control effect of the vibration by the air stick —

Hitone Inagaki¹, Masaki Saito², Yamato Nara³, Takefumi Nakazono¹ and Yasuhiro Akiyoshi⁴

1 はじめに

農業用パイプラインシステムの規模と水管理の最適化を目指して自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入した場合に、自動弁の連成による自励振動が発生し、自動減圧弁が過剰に開閉して、大きな圧力変動が長時間継続した事例が発生している。

著者らは、自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせて使用したシステムについて、現地での実証試験を実施して、現場で発生した現象を再現し、自動減圧弁単独あるいは直動式定流量弁との併用による自励振動の発生状況を検証した(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)。

検証の結果、自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動を抑制できなかったのは、安全弁の規模が小さかったことも影響していると考えられた。しかし、実験パイプラインでは施設構造の制約から、口径の大きい安全弁に交換することが困難であった。そこで、パイプラインの振動抑制には、サージタンクあるいは圧力吸収装置の設置が有効であることから(三野, 1982; 畑地農業振興会, 1988), 三野教授の助言により、自動減圧弁の下流の安全弁をサージステッキに交換する対策を講じた。そこで、本稿では、サージステッキによる自励振動の抑制効果について報告する。

2 自動弁を用いたパイプラインの圧力振動

既報(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)における実験結果により、自動減圧弁についての通水停止時の圧力遮断性能と通水開始時の圧力制御性能や直動式定流量弁などの自動弁との連成振動については、種々の知見が得られたので以下に総括する。

¹宮崎大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

²クラウンエンジニアリング(株) 副社長 Vice President, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

³クラウンエンジニアリング(株) 技師 Engineer, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

⁴宮崎大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1

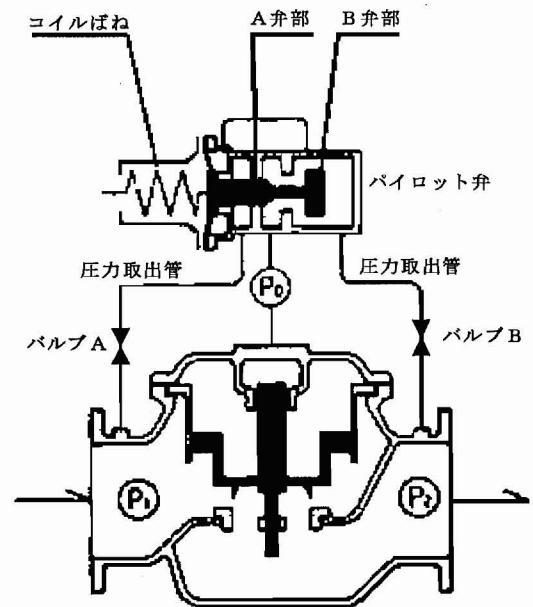


図 1: 自動減圧弁の作動機構

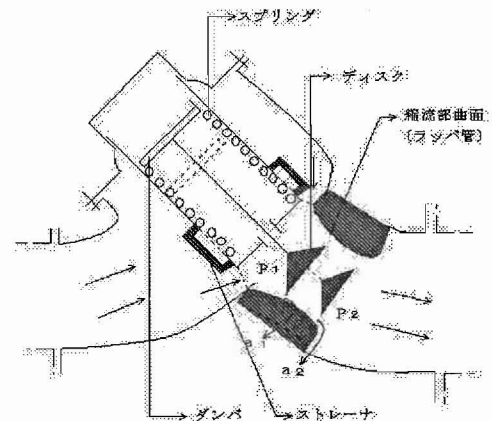


図 2: 直動式定流量弁の作動機構

- (1) 通水停止時の圧力遮断性能: 自動減圧弁を小さい開度で使用すると、弁体が全閉との往復を繰り返すチャ

表 1: 減圧弁の設定圧力

機種	口径 mm	管心高 EL.m	HWL EL.m	余裕高 m	作動圧力標高 EL.m	作動圧力 MPa	設定流量 m ³ /s
安全弁 (上流) SF1	50	124.0	170.6	20.0	182.6	0.598	
自動減圧弁	200	124.0	139.0	0.0	139.0	0.153	
直動式定流量弁 Q1	125	115.0				0.06~0.6	0.0185
直動式定流量弁 Q2	125	114.0				0.06~0.6	0.0185

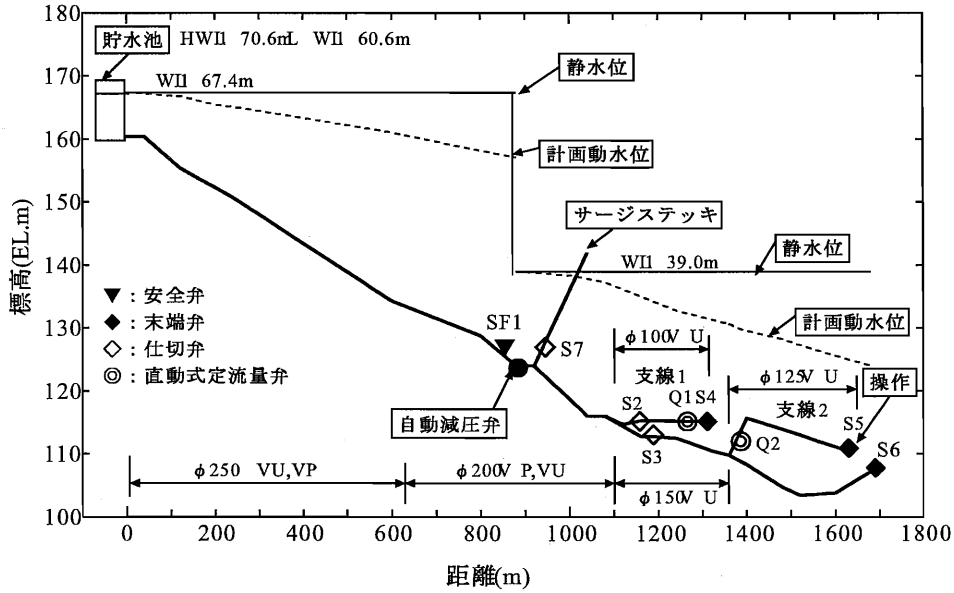


図 3: 実験パイプライン縦断図

表 1: 実験内容とバルブ操作条件

テスト NO.	幹線		サージステッキ (φ 200) S7	支線 1		支線 2	
	自動減圧弁 (φ 200) パイロット弁のバルブ			仕切弁 (φ 150) S2	末端弁 (φ 100) S4	仕切弁 (φ 150) S3	末端弁 (φ 125) S5
	A (上流)	B (下流)					
	○全開	△ 60°				●	
1 - 2	○	△				●	▲
2 - 3	○	△				●	●
3 - 4	○	△				●	▼
4 - 5	○	△				●	
5 - 6	○	△	●			●	
6 - 7	○	△	●			●	▲
7 - 8	○	△	●			●	●
8 - 9	○	△	●			●	▼
9 - 10	○	△	●			●	
10 - 11	○	△	●			●	▲
11 - 12	○	△	●			●	●
12 - 13	○	△	●			●	▼
13 - 14	○	△	●			●	
14 - 15	○	△				●	
15 - 16	○	△				●	▲
16 - 17	○	△				●	●
17 - 18	○	△				●	▼
18 -	○	△				●	

バルブ操作の凡例 ● : 全開, 空白 : 全閉, ▲ : 開操作, ▼ : 閉操作

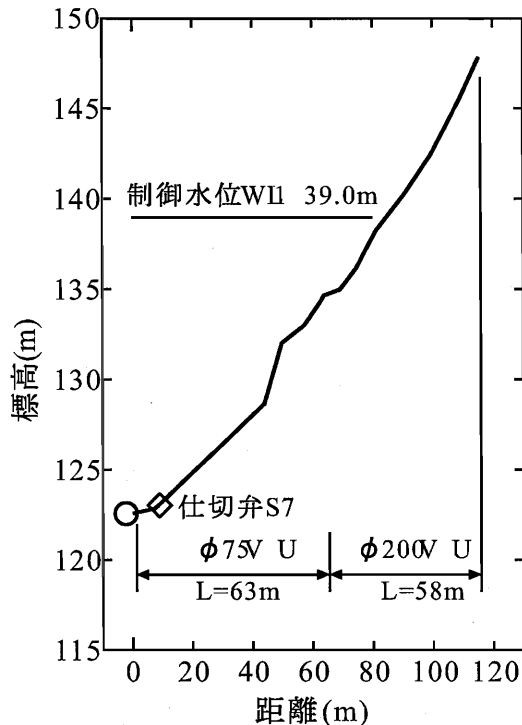


図 4: サージステッキ縦断面図

タリングを生じ、通水の停止に伴う自動減圧弁の圧力振動が発生するが、時間の経過とともにその大きさが減少し、やがて収束する傾向にある。

- (2) **仕切弁の連成振動**: 排泥弁のように、仕切弁を開操作すると大気解放状態となる場合は、自動弁に比べて自励振動が発生しにくいと考えられる。**フロート弁の連成振動**: フロート弁を用いる自動給水栓は、管路圧力の影響を受けてバルブが自動的に稼働するため、自動減圧弁との連成による自励振動が発生しやすいと考えられる。
- (3) **直動式定流量弁の連成振動**: 直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性がある。
直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しないものと推察される。
- (4) **自動減圧弁の応答感度の調節効果**: 減圧弁の1次側への圧力伝播を防止するために、2次側に対する応答速度を遅くすることはある程度有効であるが、応答遅れにより2次側圧力の圧力振動が増加するものと考えられる。従って、減圧弁を用いた管路における圧力の自励振動の発生は、減圧弁の応答感度を鈍くすることのみでは、完全に抑制できないと判断される。2次側圧力に対する応答速度を遅く設定すると、通水を停止する時の2次圧上昇に減圧弁の圧力制御が追従できず、2次側圧力の過剰な上昇を招く可能性がある。
2次側圧力に対する応答速度を速く設定すると、2次側の圧力振動に減圧弁が敏感に反応して、振幅を増幅し、大きな圧力振動を上流側へ伝播させる可能性がある。

- (5) **安全弁による振動抑制効果** 通水の開始や停止において、末端バルブを閉鎖や解放することにより、一時的に大きな圧力上昇を生じた場合は、減圧弁の上下流側に設置した安全弁が作動することにより、圧力振動は徐々に減衰させることができる。
自動減圧弁の上下流側に設置した安全弁の規模が小さい場合は、安全弁が自動弁の連成振動に起因する圧力振動に反応して断続的に作動しても、圧力振動が減衰しないと考えられる。

これまでの実験結果ら、自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動が発生した場合は、自動減圧弁の応答感度の調節のみでは、圧力振動を完全に抑制することはできないと考えられる。

対策としては、安全弁により過剰な圧力を系外へ放出することで、圧力振動を抑制することができるが、安全弁の規模が不足する場合は、効果があまり期待できない。実験を行ったパイプラインにおいては、本管口径φ 200mmに対して、安全弁の口径がφ 40, 50mmであり、口径比で1:5である。安全弁の口径は、本管口径が200mm程度であれば同口径は必要であるという報告(稲垣ら 1999)があり、これに比べて安全弁の口径が大きく不足していると考えられる。

なお、自動減圧弁を用いたパイプライン、定流量弁を用いた流量制御システムなどについては、既報(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)に記述しているので参照されたい。

3 自動減圧弁の作動機構

図 1 に新型の自動減圧弁の作動機構の概要図を示すが、減圧弁上下流の管路圧力を細管で取り出し、2次圧を一定にするように外部のパイロット弁で弁体を駆動する方式である(農業土木事業協会 2000a)。実際の2次圧が設定圧より大きければ、1次側圧力を弁体上部に作動させて、閉方向に駆動し、2次圧が設定圧より小さい時には、2次側圧力を弁体上部に作動させて、開方向に駆動することに特徴がある。2次圧が設定圧付近にあり安定している状態では、弁体上部にはパイロット弁内で1, 2次圧が混合された圧力が作用している。

通常の応答速度の調節は、減圧弁上下流側の圧力取出細管に設置したバルブ A, B の開度を変化させて、パイロット弁に導入する1, 2次圧の大きさを調節することにより行う。バルブを開けば、管路の圧力がそのまま導入されるので、応答速度は速くなるが、バルブを絞ればパイロット弁に導入される圧力が管路圧力より小さくなるので応答速度が遅くなる。

3.1 直動式定流量弁の作動機構

実験で使用した定流量弁は、図 2 の概要図に示すように管路の中にバネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁(農業土木事業協会 2000b)である。直動式定流量弁は、弁体前後の圧力差が大きくなると、弁体が閉方向に移動して、通水断面積を減少させるため、管路の圧力波動と弁振動が連成して、自励振動が発生する可能性がある。さらに、直動式定流量弁を自動減圧弁と組み合わせる場合は、複数の自動弁の連成による自励振動の発生の可能性を考慮する必要がある(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)。

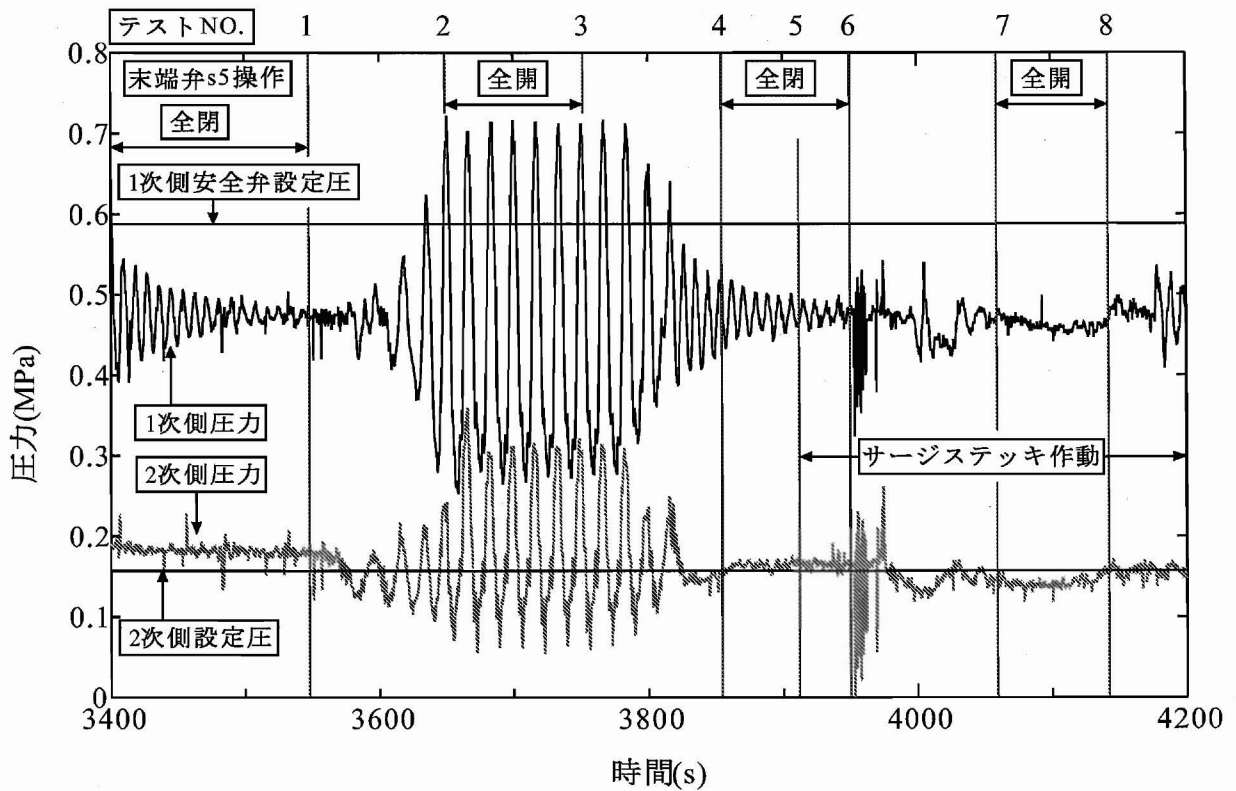


図 5: 減圧弁 1, 2次側圧力 (テスト NO.1~9)

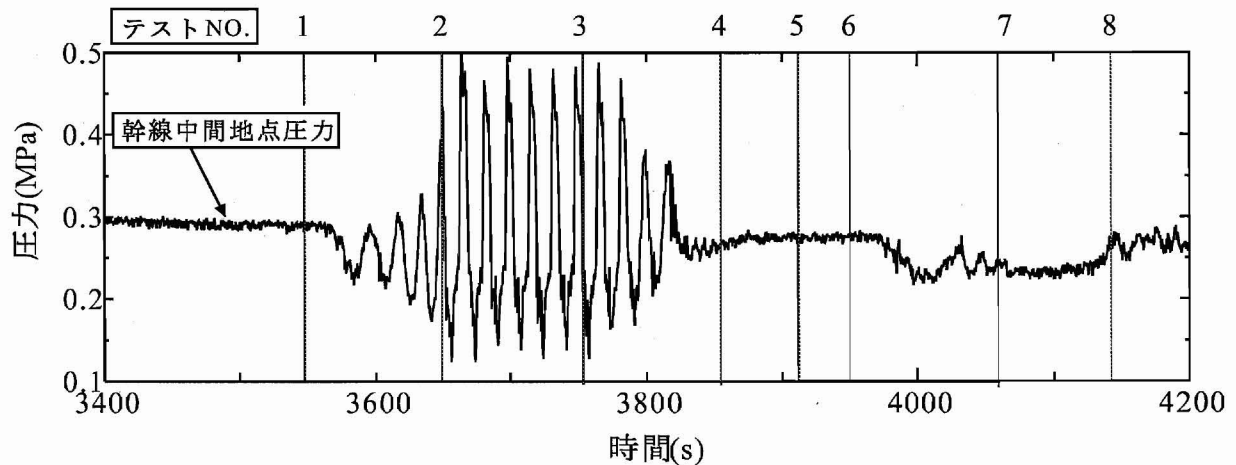


図 6: 支線 2 分岐地点圧力 (テスト NO.1~9)

4 実証パイプラインの概要

現地実証試験を行ったパイプラインは、図 3 のパイプライン縦断面図に示すように、水源を貯水池とする延長約 1.7km、計画流量 $0.0926\text{m}^3/\text{s}$ の自然流下パイプラインである。水源貯水池の水位は、HWL 170.6m, LWL 161.6m であり、通常の管理水位は NWL 167.4m である。

さらに、貯水池より約 900m の地点で自動減圧弁により静水位 NWL 167.4m から約 28m 減圧して、減圧弁下流の制御水位を WL 139.0m とする 1 段減圧方式を採用している。なお、幹線末端の仕切弁 S6 は、実験中は常に閉鎖している。

また、貯水池から 1.1km と 1.3km の地点で幹線から支線へ分岐し、分岐した支線側に直動式定流量弁 Q1, Q2 が設置されている。なお、支線 1 末端の末端弁 S4 は、実験中は常に閉鎖しているため、通水は支線 2 のみとなっ

ている。支線 2 末端に設置した末端弁 S5 を操作した場合、支線の途中に設置した直動式定流量弁により、幹線からの分水量が規制され、過剰な分水が防止できるシステムとなっている。

付帯施設として、制水弁として幹線に仕切弁 S3 を、支線に仕切弁 S2 を設置している。さらに、既報 (稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b) においては、過剰な圧力を管路から放出するために自動減圧弁の上下流側には、安全弁 SF1, SF2 を設置していたが、下流側の安全弁 SF2 を撤去した。

減圧弁の作動圧力および定流量弁の設定流量は表 1 に示すように設定している。その他の仕切弁、末端弁の口径については、表 2 に示している。

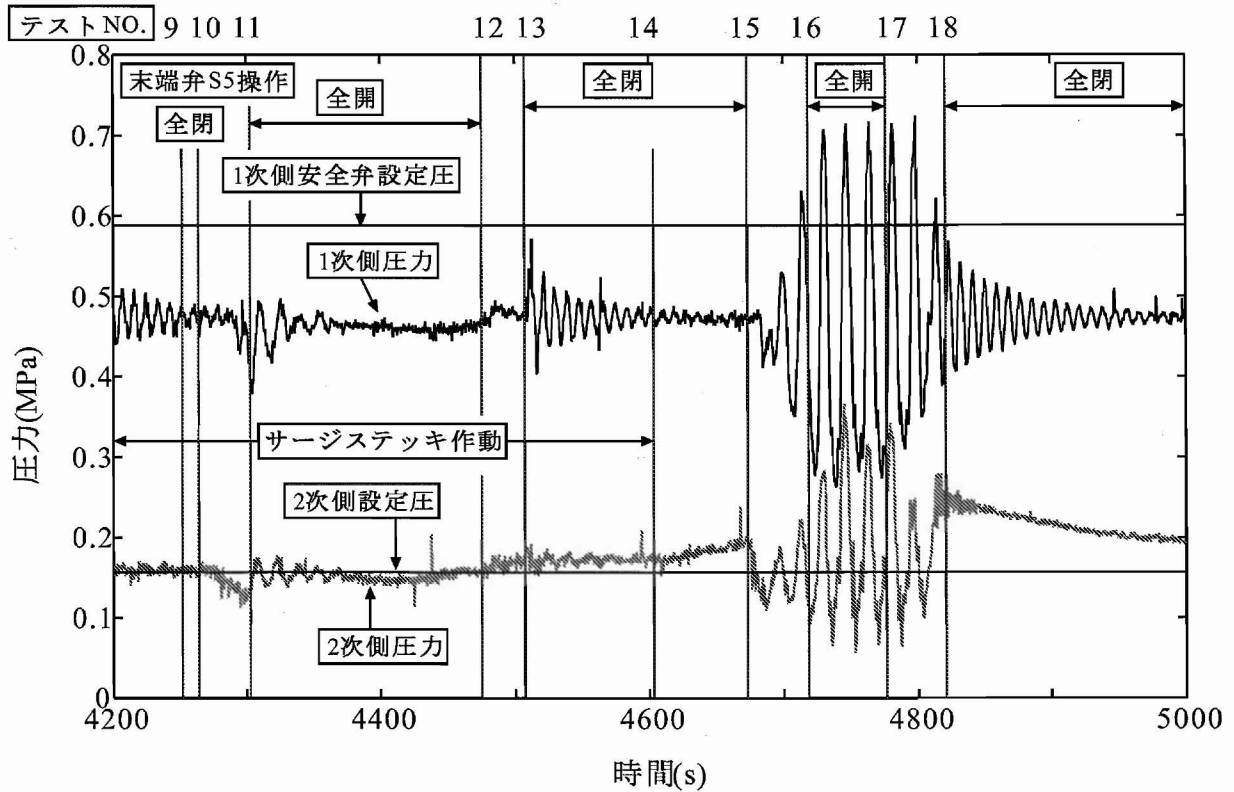


図 7: 減圧弁 1, 2 次側圧力 (テスト NO.9~18)

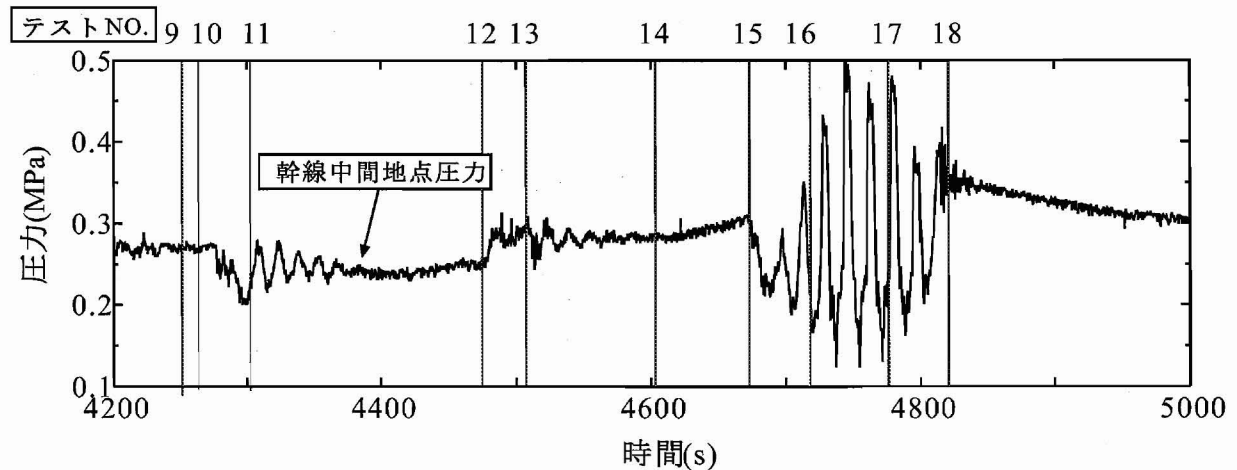


図 8: 支線 2 分岐地点圧力 (テスト NO.9~18)

5 サージステッキの概要

圧力振動の抑制対策として、図 3 のパイプライン縦断図に示すように、自動減圧弁の下流側において分岐したサージステッキを延長約 120m、減圧弁下流の制御水位 WL 139.0m 以上の EL 149.0m の高さまで設置した。実験パイプラインは、山裾を下るように設置されているので、片側が山の斜面となっており、減圧弁の位置から山側にサージステッキを設置することが可能であった。

サージステッキは、幹線から分岐後の上流部約 63m 区間は口径 75mm、それより下流部の 58m は口径 200mm と設定した。圧力振動によりステッキ内の水面が移動する範囲を本管口径と同じ口径 200mm に拡大した。また、幹線から分岐して約 5m 地点に仕切弁 S7 を設置し、ステッキの作動を操作した。

6 実証試験の内容

実証試験の内容は、表 2 の実証試験の条件一覧表に示すが、左端の欄のテスト NO. は、実験の内容毎の区切りを示しており、計測結果を時系列的に図示した図 5~8 において、縦線と番号の組み合わせで区分の境を示している。

実験は、テスト NO.1~18 に分かれており、主に直動式定流量弁の自動減圧弁との連成振動の発生とサージステッキによる圧力振動の抑制効果について、検証を行った。実験の概要は以下に示すとおりである。なお、支線 2 の仕切弁 S3 は、実験中は全開しておき、流量の調整は末端弁 S5 により行った。また、サージステッキの稼働・停止は、ステッキ分岐側の仕切弁 S7 の全開・全閉操作により行った。

表 2 に実験時の自動減圧弁のパイロット弁のバルブ A, B の開度を示すが、上流側のバルブ A を全開、下流側の

バルブ B を 60° に設定し、実験中はこの開度を維持している。

- (1) テスト NO.1~5: 仕切弁 S7 を閉鎖し、サージステッキを停止した状態とする。さらに、通水を停止している状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作し、約 100 秒間で全開する。その後、末端弁 S5 の全開状態を約 100 秒間継続した後、閉操作を開始し、約 100 秒間で全閉状態とした。
- (2) テスト NO.5~9: 仕切弁 S7 を全開し、サージステッキを稼働した状態とする。さらに、通水を停止している状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作し、約 100 秒間で全開する。その後、末端弁 S5 の全開状態を約 75 秒間継続した後、閉操作を開始し、約 100 秒間で全閉状態とした。
- (3) テスト NO.9~14: 基本的なバルブ操作はテスト NO.5~9 と同じであり、仕切弁 S7 を全開し、サージステッキを稼働した状態としている。支線 2 の末端弁 S5 を全開あるいは全閉する時間は約 35 秒に短縮し、末端弁 S5 の全開状態は約 115 秒間に延長させた。
- (4) テスト NO.14~18: 基本的なバルブ操作はテスト NO.1~5 と同じであり、仕切弁 S7 を閉鎖し、サージステッキを停止した状態としている。支線 2 の末端弁 S5 を全開あるいは全閉する時間は約 40 秒に、末端弁 S5 の全開状態は約 50 秒間に短縮させた。

7 実験結果

自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動が発生した状況の中で、サージステッキの振動抑制効果について、実験結果を検証した。

7.1 サージステッキを停止した場合

テスト NO.1~5 と 14~18 において、サージステッキの仕切弁 S7 を閉鎖しておき、幹線の通水を停止した状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作し、全開状態を維持した後、末端弁 S5 を徐々に閉操作し、全閉した。

- (1) テスト NO.1~2, 15~16: 通水を停止した状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作するため、開操作開始の初期段階では、圧力振動は発生していない。これは、直動式定流量弁 Q2 は、支線 2 の通水量が小さいため、十分な定流量機能が作動していないことが影響していると推察される。
末端弁 S5 の開度が大きくなるにつれて、直動式定流量弁 Q2 を設定流量付近で使用することにより、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、圧力振動が発生し、その振幅の大きさは増幅している。
- (2) テスト NO.2~3, 16~17: 末端弁 S5 を全開とした後から、約 17 秒を 1 サイクルとする周期的な振動が発生しており、その振幅には変化がなく、減衰する傾向を示していない。圧力振動は、圧力を計測した自動減圧弁の 1, 2 次側と支線 2 の分岐地点において、ほぼ同じ周期で生じており、圧力振動がパイプライン全体に及んでいるものと考えられる。
圧力振動の大きさは、減圧弁の 1 次側で最小が約 0.26MPa、最大が約 0.73MPa 程度となっており、振幅は 0.47MPa である。減圧弁の 2 次側では、最小が約

0.05MPa、最大が約 0.32MPa 程度となっており、振幅は 0.27MPa である。また、支線 2 の分岐地点では、最小が約 0.11MPa、最大が約 0.50MPa 程度となっており、振幅は 0.39MPa である。従って、減圧弁の最大 2 次側圧力は制御圧力 0.153MPa より約 0.18MPa 程度上昇しており、減圧弁の 2 次圧の一部が 1 次側へ透過する現象が生じている。

定流量弁 Q2 を設置した支線 2 への分岐点において、減圧弁の 2 次側の圧力振動より大きな振動が発生しているが、これは、末端側で発生した圧力上昇が管路の摩擦により減衰しながら上流へ伝播し、減圧弁地点で反射し、圧力低下となって末端側に現れたものであると考えられる。さらに、この 2 次側の圧力振動に減圧弁が敏感に反応して、上流側へ大きな圧力振動を伝播させたものと考えられる。

減圧弁上流側の安全弁は、圧力の周期に合わせて間欠的に作動しているが、圧力振動を減衰することができない。これは、安全弁が圧力の上昇に合わせて系外へ放出する量が少ないため、安全弁による間断的な圧力放出が圧力振動を抑制するに至っていないものと考えられる。

- (3) テスト NO.3~4, 17~18: 支線 2 の末端弁 S5 を全開にした通水状態から、末端弁 S5 を徐々に閉操作するため、閉操作開始の初期段階では、圧力振動は発生している。しかし、末端弁 S5 の開度が小さくなるに合わせて、圧力の振幅が小さくなり、徐々に減衰する傾向を示している。末端弁 S5 が全閉した後は、圧力振動は周期を短くしながら減衰し、やがて一定値に収束している。

7.2 サージステッキを稼働した場合

テスト NO.5~9 と 9~14 において、サージステッキの仕切弁 S7 を全開して、サージステッキを稼働しておき、幹線の通水を停止した状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作し、全開状態を維持した後、末端弁 S5 を徐々に閉操作し、全閉した。

- (1) テスト NO.6~7, 10~11: 通水を停止した状態から、支線 2 の末端弁 S5 を徐々に開操作するため、開操作開始の初期段階では、一時的な圧力振動が発生する可能性があるが、減圧弁 2 次側の圧力は、制御圧力に維持されている。減圧弁地点と支線 2 分岐地点においても、問題となるような圧力振動は発生していない。
- (2) テスト NO.7~8, 10~12: 末端弁 S5 を全開とした後においても、減圧弁の応答遅れにより 2 次側圧力が低下し、一時的に圧力振動を生じる可能性があるが、減圧弁 2 次側の圧力は、制御圧力に維持されている。減圧弁地点と支線 2 分岐地点においても、大きな圧力振動は発生していない。
減圧弁 2 次側と支線 2 分岐地点の圧力振動の振幅を比較すると、末端側の支線 2 分岐地点の方が大きくなっているため、末端側で発生した圧力上昇が管路の摩擦により減衰しながら上流へ伝播しているものと考えられる。
サージステッキを稼働することにより、パイプライン全体で発生していた圧力振動は消滅している。パイプラインの振動抑制には、自由表面を有するサージ

ステッキの設置が非常に有効であることが確認できた。なお、サージステッキの口径は、本管の口径と同程度が適当であると考えられ、口径が小さくなるほど、圧力振動はサージステッキがない状況に近づくことと推察される。

- (3) テスト NO.8~9, 12~13: 支線 2 の末端弁 S5 を全開にした通水状態から、末端弁 S5 を徐々に閉操作するが、減圧弁地点と支線 2 分岐地点においても、減圧弁の 1 次側に小さな圧力振動が発生する場面があるものの、問題となるような圧力振動は発生していない。また、減圧弁 2 次側の圧力は、制御圧力に維持されている。

8 まとめ

自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせたシステムにおける圧力振動の抑制対策については、以下のように整理できる。

- (1) パイプラインの振動抑制には、自由表面を有するサージステッキの設置が非常に有効である。なお、サージステッキの口径は、本管の口径と同程度が適当である。
- (2) 三野は、畑地かんがい技士養成講習会テキスト(1988)の中で、管路の途中に設置したサージタンクが本管口径と同一面積を持つ場合には、水撃圧は約 20% に減殺されることを示していることから、本実験結果は妥当なものであると判断される。
- (3) 自動減圧弁を用いたパイプラインの場合は、周囲にサージステッキを設置できる斜面が存在する可能性は低いので、安全弁やエアバッグによる対策が選択肢として必要になる。エアバッグは、塩化ビニル管では圧力振動抑制の効果が小さいので、自動減圧弁を用いた低圧化パイプラインには、有効な対策とは言えない(斎藤ら 1996; 斎藤ら, 1997)。
- (4) 自動減圧弁の上下流側に設置した安全弁の規模が小さい場合は、安全弁が圧力の周期に合わせて間欠的に作動しても、圧力振動が減衰しないと考えられる。三野(1975)は、安全弁を管路の途中に設置することが最も簡単な圧力抑制対策であるが、安全弁の口径は、ある程度の大きさを確保しなければ効果が得られないことを指摘している。
- (5) 安全弁の口径は、本管口径が 200mm 程度であれば同口径は必要であるという報告(稲垣ら 1999)があるが、本管口径と同口径のサージステッキが振動抑制に効果を発揮したことを考慮すると、安全弁の口径は本管口径と同口径あるいは 1 ランク下程度が適当であると判断される。

自動減圧弁の圧力制御機能および直動式定流量弁との連成振動とその対策については、既報(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)と合わせて、現地実験の結果から発生条件と抑制対策について方向性は得られたと考えている。今後は、安全弁の適切な規模について、実験的な検討を加える必要がある。

謝辞: 本研究を遂行するに当たり、京都大学大学院 三野徹教授に貴重なご指導とご助言を賜った。また、現地

試験については、関係各位の多大な援助と協力を頂いた。なお、本研究は文部科学省科学研究費基盤 C(14560202)の支援によって行われた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 長 勝史・長 智男・黒田正治(1987): 管路における減圧弁の動特性(I), 農業土木学会論文集, 127, pp.43-50.
- [2] 長 勝史・長 智男・黒田正治(1988): 管路における減圧弁の動特性(II) - 自励振動発生現象とその発生機構 -, 農業土木学会論文集, 135, pp.91-98.
- [3] 畑地農業振興会(1988): 畑地かんがい技士養成講習会テキスト, pp.307-311.
- [4] 稲垣仁根・小倉邦雄・角田範明・近藤文義(1999): 安全弁による低圧化パイプラインシステムの水撃圧対策, 農業土木学会論文集, 200, pp.93-103.
- [5] 稲垣仁根・斎藤正樹・奈良大和・竹下伸一・秋吉康弘(2004a): セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究(I)-圧力制御機能の実験的検証-, 雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [6] 稲垣仁根・斎藤正樹・奈良大和・竹下伸一・秋吉康弘(2004b): セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究(II)-定流量弁の作動による振動発生-, 雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [7] 三野 徹(1975): 急傾斜地に設けられたパイプライン中に発生するウォーターハンマー, 農業土木学会誌, 43(12), pp.11-20.
- [8] 三野 徹(1982): パイプラインの水利設計(その 6)-水撃作用(ウォーターハンマー)-, 農業土木学会誌, 50(2), pp.41-5020.
- [9] 農業土木事業協会(2000a):かんがいパイプライン機器便覧, pp.162-165.
- [10] 農業土木事業協会(2000b):かんがいパイプライン機器便覧, pp.122-123.
- [11] 斎藤正樹・稲垣仁根(1996): 自動減圧弁によるパイプラインの低圧化システムと現地計測, 農業土木学会論文集, 183, pp.129-141.
- [12] 斎藤正樹・稲垣仁根(1997): 自動減圧弁による低圧化パイプラインの実測とシミュレーション, 農業土木学会論文集, 187, pp.111-122.

セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (IV)

-屋内短管路装置による実験的検証-

稲垣仁根¹・斎藤正樹²・奈良大和³・中園健文¹・秋吉康弘⁴

Studies on self-induced vibration of automatic pressure regulator and constant flow valve in the semi closed pipeline(IV)

- The experimental verification using the indoor short pipe conduit equipment -

Hitone Inagaki¹, Masaki Saito², Yamato Nara³, Takefumi Nkazaono¹ and Yasuhiro Akiyoshi⁴

1 はじめに

農業用パイプラインシステムの規模と水管理の最適化を目指して自動減圧弁と自動定流量弁を組み合わせたセミクローズドパイプラインの導入した場合に、自動弁の連成による自励振動が発生し、自動減圧弁が過剰に開閉して、大きな圧力変動が長時間継続した事例が発生している。

著者らは、自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせて使用したシステムについて、現地のパイプラインを使用した実証試験を実施して、現場で発生した現象を再現し、自動減圧弁単独あるいは直動式定流量弁との併用による自励振動の発生状況を検証した(稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b)。

現地実証試験を行ったパイプラインは、水源を貯水池とする延長約 1.7km, 計画流量 0.0926m³/s の自然流下パイプラインであり、自動減圧弁により静水位から約 28m 減圧する 1 段減圧方式を採用している。また、途中の 2 カ所で支線に分岐し、分岐した支線側に直動式定流量弁が設置されている。さらに、各支線の末端に設置した末端弁を操作して、流れを形成している。

検証の結果、直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性があること、直動式定流量弁の設定流量より絞った状況で使用する場合は、大きな自励振動を発生しない可能性のあることを推察できる結果が得られた。

実験パイプラインには、減圧弁 1 台、直動式定流量弁 2 台、末端弁 2 台、仕切弁 2 台、フロート弁 3 台、排泥弁 1 台と多数の機材が配置されており、パイプラインも

樹枝状に分岐しており、相互の影響を把握することが困難であった。

そこで、自動減圧弁と直動式定流量弁を直接に配置した約 15m の屋内実験パイプラインを使用して、複雑な要因を排除した条件下で、自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動について、実験的な検証を行った。そこで、本稿では、屋内短管路実験装置による自動弁の自励振動の検証結果について報告する。

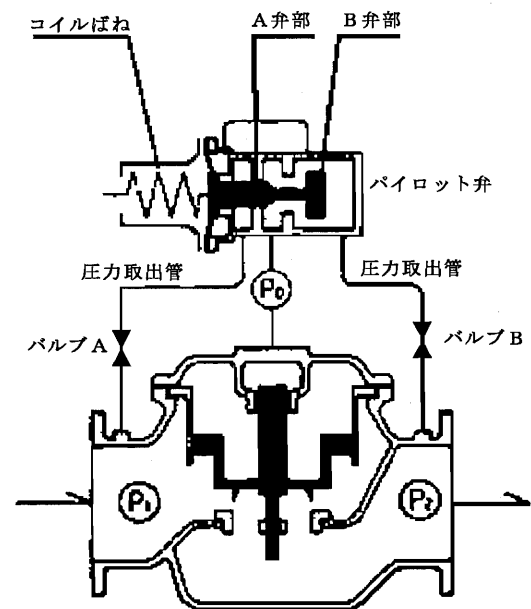


図 1: 自動減圧弁の作動機構

2 自動弁の作動機構

2.1 自動減圧弁の作動機構

図 1 に新型の自動減圧弁の作動機構の概要図を、写真 1 に自動減圧弁の実験装置を示すが、減圧弁上下流の管路圧力を細管で取り出し、2 次圧を一定にするように外部のパイロット弁で弁体を駆動する方式である(農業土木事業協会 2000a)。実際の 2 次圧が設定圧より大きければ、1 次側圧力を弁体上部に作動させて、閉方向に駆

¹宮崎大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

²クラウンエンジニアリング(株) 副社長 Vice President, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

³クラウンエンジニアリング(株) 技師 Engineer, Crown Engineering CO., LTD, 2-6-15 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

⁴宮崎大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1

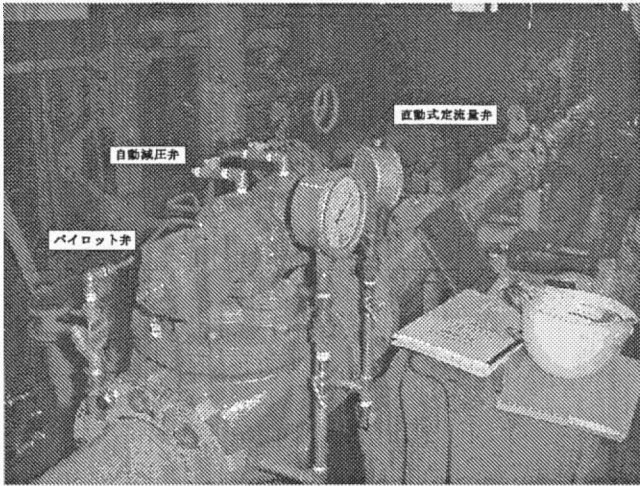


写真 1: 自動減圧弁の実験装置

動し、2次圧が設定圧より小さい時には、2次側圧力を弁体上部に作動させて、開方向に駆動することに特徴がある。2次圧が設定圧力付近にあり安定している状態では、弁体上部にはパイロット弁内で1, 2次圧が混合された圧力が作用している。

通常、の応答速度の調節は、減圧弁上下流側の圧力取出細管に設置したバルブ A, B の開度を変化させて、パイロット弁に導入する1, 2次圧の大きさを調節することにより行う。バルブを開けば、管路の圧力がそのまま導入されるので、応答速度は速くなるが、バルブを絞ればパイロット弁に導入される圧力が管路圧力より小さくなるので応答速度が遅くなる。

2.2 直動式定流量弁の作動機構

実験で使用した定流量弁は、図 2 の概要図に示すように管路の中にバネ式の駆動機構を組み込んだ直動式定流量弁（農業土木事業協会 2000b）である。写真 2 にスプリングとダンパが内蔵されたピストンの外観を示す。写真 3 にディスクの位置により流路の断面が形成されるラップ管（縮流部）の曲面を示す。

バルブ内を矢印の方向に流体が流れるとディスクはその前後に発生する差圧 $\Delta P(P2 - P3)$ により右方に移動する。ディスクの位置はその前後に発生する差圧 ΔP とスプリングの強さとの関係で定まる。流量を一定にするために、差圧 ΔP に対応するディスクの位置に対して縮流部面積を (1) 式より算出しラップ管を設計製作している。

$$Q = ac\sqrt{\frac{2g\Delta P}{\rho_w}} \quad (1)$$

ここで、 Q = 流量、 a = 通水断面積、 c = 流量係数、 ρ_w = 水の密度、 g = 重力加速度である。

直動式定流量弁は、弁体前後の圧力差が大きくなると、弁体が閉方向に移動して、通水断面積を減少させるため、管路の圧力波動と弁振動が連成して、自励振動が発生する可能性がある。さらに、直動式定流量弁を自動減圧弁と組み合わせて使用する場合は、複数の自動弁の連成による自励振動の発生の可能性を考慮する必要がある（稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b）。

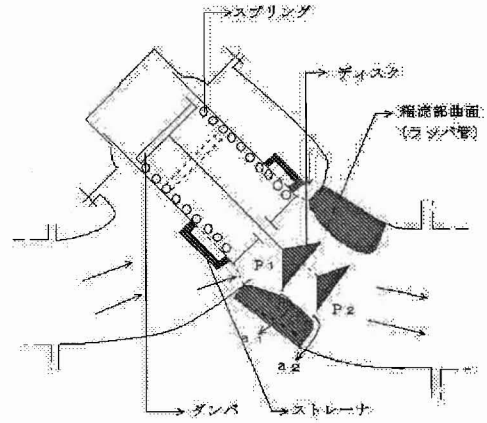


図 2: 直動式定流量弁の作動機構

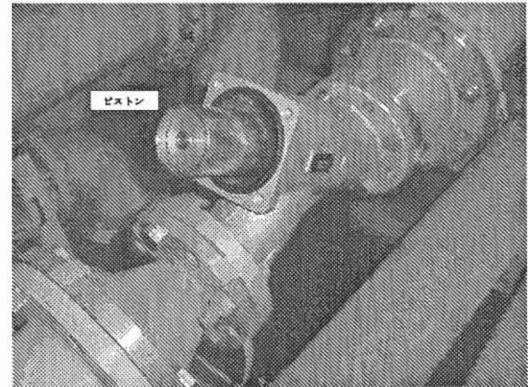


写真 2: 直動式定流量弁（ピストン）

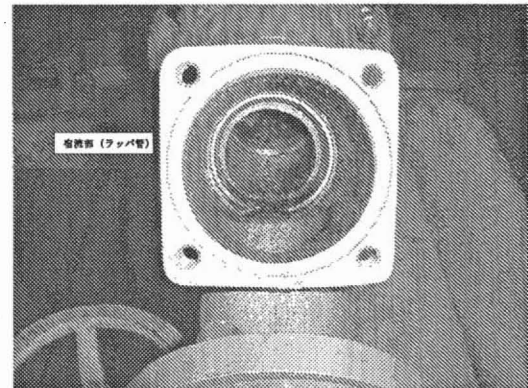


写真 3: 直動式定流量弁（縮流部）

3 屋内短管路実験装置

屋内短管路実験装置は、屋内に設置した延長約 15m のラインであり、管種は鋼管を使用し、口径は 200mm である。図 3 に実験装置の縦断面図を示すが、機器の配置は、上流側から加圧ポンプ、バルブ V1、超音波流量計（写真 4）、圧力計 P1（写真 4, 5）、自動減圧弁（写真 5, 6）、圧力計 P2（写真 6）、直動式定流量弁（写真 7）、圧力計 P3（写真 7）、圧力タンク、末端バルブ V2（写真 8）を設置している。

上流部のバルブ V1 は、開度を手動で設定して、実験装置の上流側で実験ラインの系外に放流する量を制御することにより、バルブの1次側に作用する圧力 $P1, P2$ を調節する。また、末端バルブ V2 は、開度を手動で設定することにより、流量を制御する。計測した圧力と流量は、AD コンバーターを経由して、パソコンに取り入れ、時系列変化を作曲し、データとして保存するシステムと

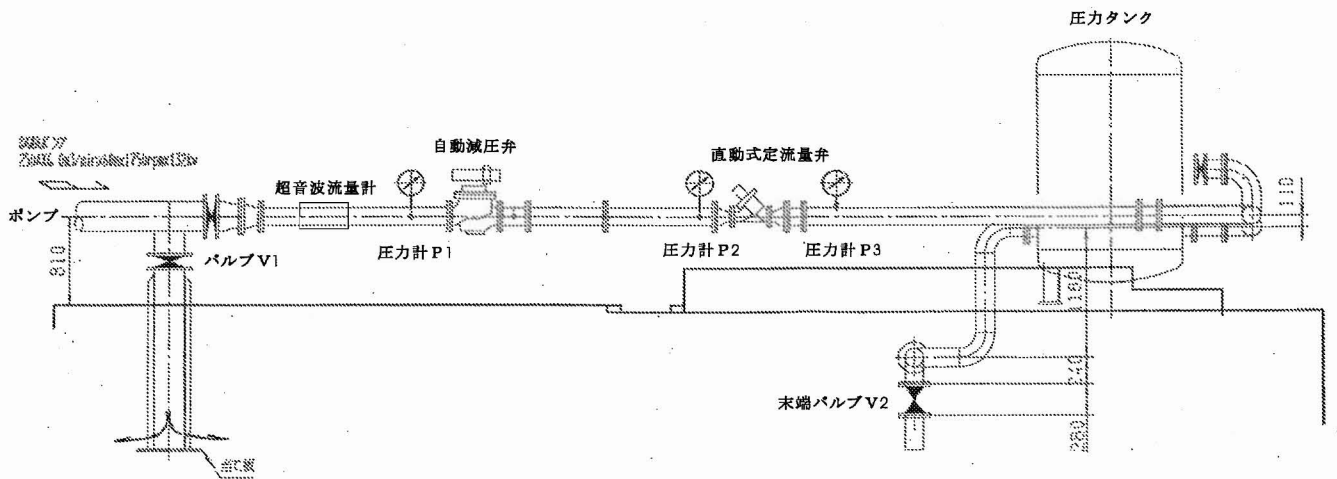


図 3: 屋内短管路実験装置

している。

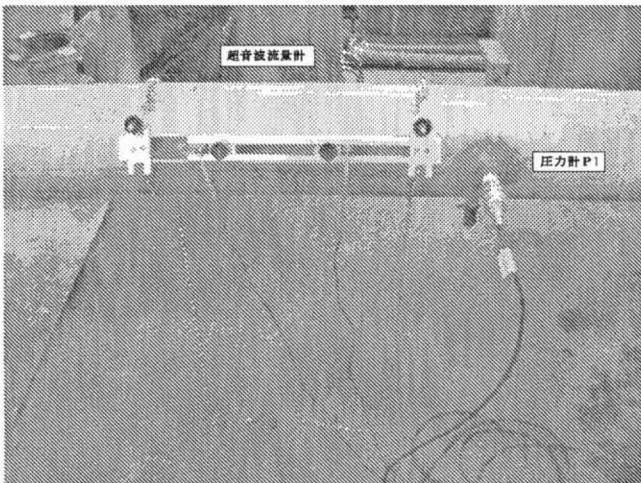


写真 4: 超音波流量計と圧力計 P1

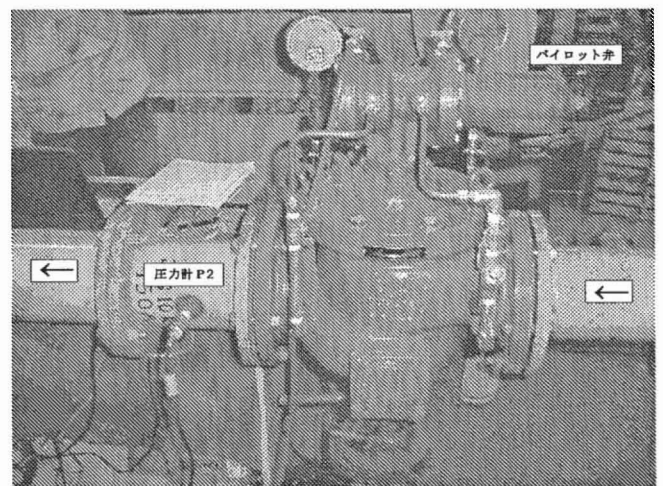


写真 6: 減圧弁と圧力計 P2

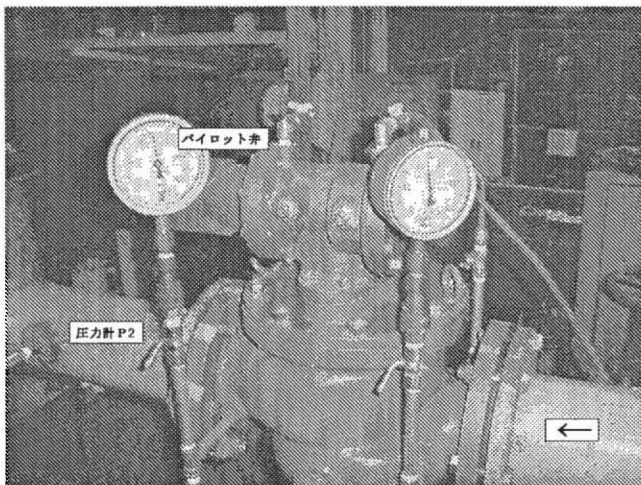


写真 5: 圧力計 P1 と減圧弁

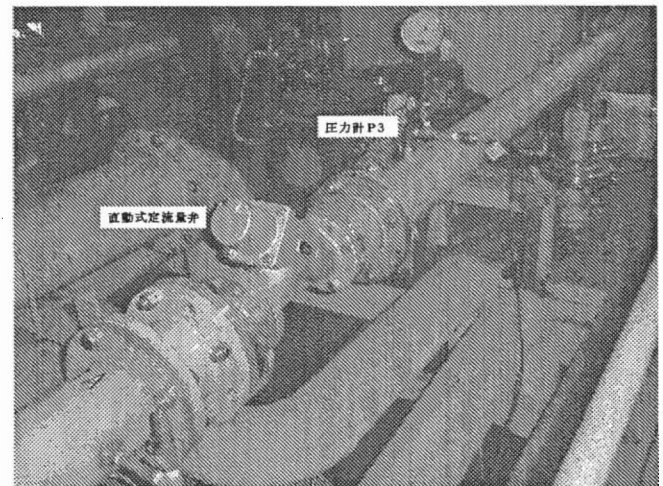


写真 7: 直動式定流量弁と圧力計 P3

発生について、検証を行った。実験の概要は以下に示すとおりである。

4 実験の内容

実験の内容は、表 1 の実験の条件一覧表に示すが、検討対象とするバルブの組み合わせにより 4 種類に分かれており、主に直動式定流量弁の自動減圧弁との連成振動の

- (1) 実験 1: この実験では、定流量弁の機能を停止し自動減圧弁のみの状態にして実験を行い、各実験における自動減圧弁の 1 次圧の振動の変化を検証する。実験開始時に、自動減圧弁の 1 次圧 P1 を 0.7MPa、2 次圧 P2 を 0.2MPa、流量 Q を $0.6\text{m}^3/\text{min}$ に設定し、

表 1: 実験内容とバルブ操作条件

実験 NO.	テスト NO.	時間 (S)	バルブ V1	自動減圧弁 設定 2 次圧 P2(MPa)	定流量弁 設定流量 Q(m3/s)	バルブ V2
実験 1	①	0		0.2	×	
		106	○	↓	×	
		147	○	↓	×	
		194	○	↓	×	
		241	○	↓	×	
		281	○	↓	×	
	②	328	●	↓	×	
		400		↓	×	●
	③	684		↓	×	●
		728		↓	×	●
		816		↓	×	●
		913		↓	×	●
		1000		↓	×	
実験 2	①	0		×	0.56	
		200	●	×	↓	
		269	●	×	↓	
		375	○	×	↓	
	②	569	○	×	↓	
		631	○	×	↓	
		728	○	×	↓	
		797	○	×	↓	
		922	○	×	↓	
実験 3	①	0		0.2	0.56	
		134		↓	↓	○全開
	②	219		↓	↓	●全閉
		303	○	↓	↓	○全開
	③	369		↓	↓	●
		428		↓	↓	●
		475		↓	↓	●
	④	559		↓	↓	●
		759	●	↓	↓	
		950		↓	↓	
実験 4	①	0		0.2	0.56	
		45	●	↓	↓	
		105	●	↓	↓	
		165	●	↓	↓	
		210	●	↓	↓	
		260	●	↓	↓	
		320	●	↓	↓	
	②	400	○	↓	↓	
		465		↓	↓	●
		715	●	↓	↓	
	③	835	●	↓	↓	
		900	○	↓	↓	
		955	○	↓	↓	
		1010	○	↓	↓	
		1075	○	↓	↓	
		1160	○	↓	↓	
		1340	●	×	↓	
④	1395	●	×	↓		
	1435	●	×	↓		
	1485	●	×	↓		
	1570	●	×	↓		

凡例 ○ : 開操作, ● : 閉操作, × : 機能停止

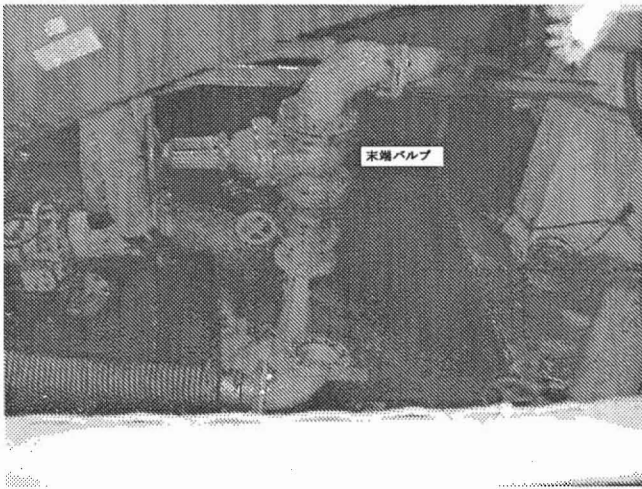


写真 8: 末端バルブ

以下の①, ②の操作を行う。

①上流部のバルブ V1 を段階的に開操作し, 自動減圧弁の 1 次圧 P1 を初期圧力 0.7MPa から, 2 次側設定圧力の 0.2MPa まで段階的に減少させ, そのときの圧力振動の発生を検証する。

②上流部のバルブ V1 を閉操作し, 自動減圧弁の 1 次圧 P1 を 0.5MPa まで上昇させる。

③末端バルブ V2 を閉操作し流量 Q を 0.45m³/min から 0.05m³/min まで段階的に減少させ, そのときの圧力振動の発生を検証する。

- (2) 実験 2: この実験では, 自動減圧弁の機能を停止し, 定流量弁のみの状態にして実験を行い, 各実験における定流量弁の 1 次圧の振動の変化を検証する。実験開始時に, 定流量弁の 1 次圧 P2 を 0.5MPa, 定流量弁の 2 次圧 P3 を 0.05MPa, 流量 Q を 0.56m³/min に設定し, 以下の①, ②の操作を行う。

①上流部のバルブ V1 を段階的に開操作し, 定流量弁の 1 次圧 P2 を 0.5MPa から 0.75MPa まで段階的に増加させ, その時の圧力と流量の変化を検証する。

②上流部のバルブ V1 を段階的に開操作し, 定流量弁の 1 次圧 P2 を 0.5MPa から 0.05MPa まで段階的に減少させ, その時の圧力と流量の変化を検証する。

- (3) 実験 3: この実験では, 自動減圧弁と定流量弁の両方が稼働する状態で実験を行い, 各実験における自動減圧弁の 1 次圧の振動の変化を検証する。実験開始時に, 自動減圧弁の 1 次圧 P1 を 0.5MPa, 定流量弁の 1 次圧 P2 を 0.2MPa, 定流量弁の 2 次圧 P3 を 0.05MPa, 流量 Q を 0.56m³/min に設定し, 以下の①~④の操作を行う。

①末端バルブ V2 を全開にして, 定流量弁下流側の圧力 P3 を低下させ, その時の圧力の振動と流量の変化を検証する。

②末端バルブ V2 を全閉にして, 定流量弁下流側の圧力 P3 を増加させ, その時の圧力の振動と流量の変化を検証する。

③末端バルブ V2 を段階的に閉操作して, 定流量弁下流側の圧力 P3 を段階的に増加させることにより, 上流側圧力 P2 との圧力差 ΔP を減少させ, 定流量弁の上下流の圧力差が減少する時の流量の変化を検証する。

④上流部のバルブ V1 を閉操作し, 小流量時において減圧弁の上流側圧力 P1 を増加させた場合の圧力と流量の変化を検証する。

- (4) 実験 4: この実験では, 前半は自動減圧弁と定流量弁の両方が稼働する状態で実験を行い, 各実験における自動減圧弁の 1 次圧の振動の変化を検証する。後半は自動減圧弁の機能を停止し定流量弁のみの状態で実験を行い, 定流量弁の 1 次圧の振動の変化を検証する。実験開始時に, 自動減圧弁の 1 次圧 P1 を 0.25MPa, 定流量弁の 1 次圧 P2 を 0.2MPa, 定流量弁の 2 次圧 P3 を 0.05MPa, 流量 Q を 0.56m³/min に設定し, 以下の①~③の操作を行う。

①上流部のバルブ V1 を段階的に開操作し, 減圧弁の上流側圧力 P1 を段階的に増加させ, その時の減圧弁の 2 次側圧力制御と定流量弁の流量制御の機能を検証する。

②末端バルブ V2 を閉操作し流量 Q を減少させ, この状態から上流部のバルブ V1 を閉操作し, 小流量時において減圧弁の上流側圧力 P1 を増加させた場合の圧力と流量の変化を検証する。

③②の最後の状態から, 上流部のバルブ V1 を段階的に開操作し, 小流量時において減圧弁の上流側圧力 P1 を減少させた場合の圧力と流量の変化を検証する。

④③の最後の状態から自動減圧弁の機能を停止し, 上流部のバルブ V1 を段階的に閉操作して, 減圧弁の上流側圧力 P1 を段階的に上昇させ, その時の圧力と流量の変化を検証する。

5 実験結果

自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動が発生について, 実験結果を検証した。

5.1 定流量弁の機能を停止し自動減圧弁のみの状態

5.1.1 実験 1

図 5 は実験 1 における圧力と流量の変化を示したものであるが, ①の実験において, 減圧弁上流のバルブ V1 を操作し, 減圧弁の 1 次側の圧力 P1 を変化させた場合, 減圧弁の 2 次側圧力 P2 には過剰な振動の発生は認められない。また, ②の実験において, 流量を段階的に減らした場合においても, 減圧弁の上下流の圧力に過剰な振動の発生は認められなかった。実験①, ②を通して, 減圧弁の 2 次側圧力 P2 は, 設定した目標圧力 0.2MPa にほぼ制御されている。

5.1.2 考察

この結果より考察すると, 減圧弁のみを作動させた状態においては, 減圧弁の 1 次側の圧力または流量を段階的に変化させた場合, 減圧弁の上下流側の圧力には振動の発生というような問題となるような現象は発生せず, 減圧弁の 2 次側圧力 P2 は設定圧力に制御されるものと考えられる。

5.2 自動減圧弁の機能を停止し, 定流量弁のみの状態

5.2.1 実験 2

図 6 は実験 1 における圧力と流量の変化を示したものであるが, ①, ②の実験において, 定流量弁の上流側のバルブ V1 を操作して, 圧力を増加, 減少させても, 2 次側圧力 P2 や流量に過剰な振動の発生は認められなかった。

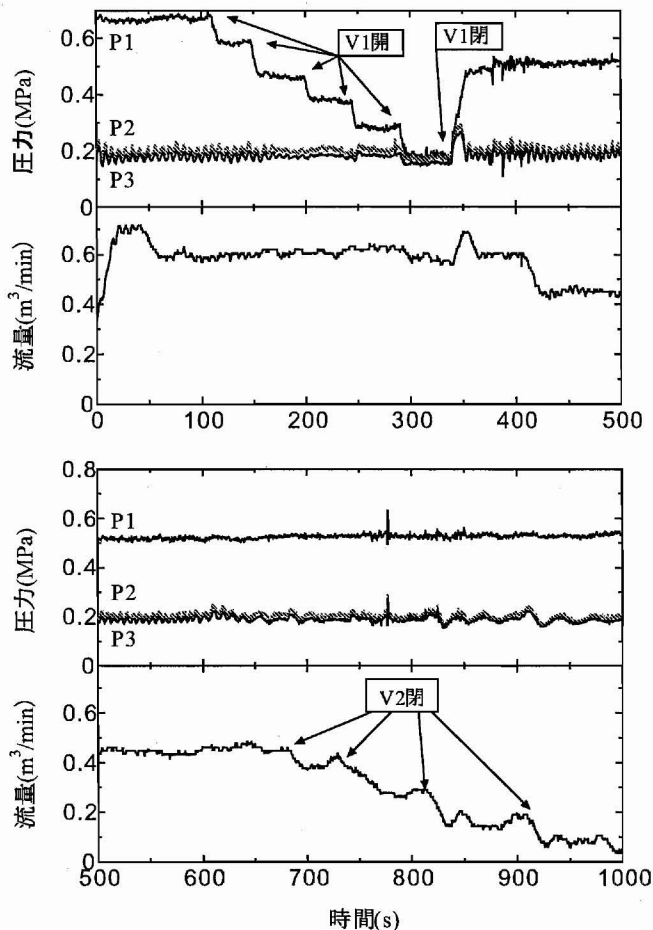


図 5: 圧力と流量の時間変化 (実験 1)

流量については、定流量弁 1 次側の圧力が 2 次側圧力に一致して、圧力差 ΔP がなくなると流量は大きく減少して、定流量機能は作動しなくなる。しかし、定流量弁の上下流で僅かでも圧力差 ΔP が確保できていれば、定流量機能は作動している。

5.2.2 実験 4

図 8 は実験 4 における圧力と流量の変化を示したものであるが、④の実験において、自動減圧弁の 2 次側圧力制御機能を停止し、定流量弁のみを稼働させた状態としている。しかし、減圧弁 2 次側圧力 P2 と定流量弁 2 次側圧力 P3 はほぼ同じ大きさであり、定流量弁の上下流の圧力差がほとんどなくなるため、定流量弁の作動圧力 ΔP が確保できなくなり、定流量機能は作動しなくなっている。

5.2.3 考察

この結果より考察すると、定流量弁の 1 次側の圧力が増加、減少しても、定流量弁の上下流で作動圧力 ΔP が確保できていれば、定流量弁は上流部および下流部に影響を与えることなく、定流量機能が作動すると考えられる。一方、定流量弁の上下流の圧力差 ΔP がなくなると流量は大きく減少して、定流量機能は作動しなくなる。

5.3 自動減圧弁と定流量弁の両方が稼働する状態

5.3.1 実験 3

図 7 は実験 3 における圧力と流量の変化を示したものであるが、①と③の実験において、末端バルブ V2 を操作

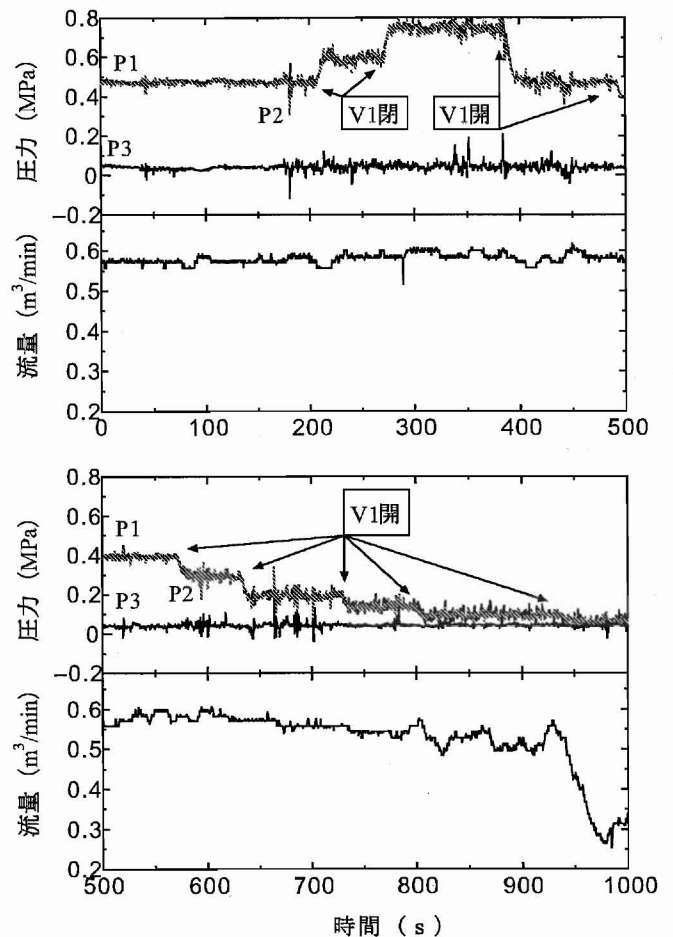


図 6: 圧力と流量の時間変化 (実験 2)

して、定流量弁下流側の圧力 P3 を増減させたが、その時の流量は設定流量 $0.56 \text{ m}^3/\text{min}$ の近傍に維持されており、さらに減圧弁の 2 次側圧力 P2 も設定圧力 0.2 MPa に制御されている。

実験②において、末端バルブ V2 を全閉して流量をゼロにすると、定流量弁下流側の圧力 P3 は、減圧弁の 2 次側圧力 P2 まで増加している。その場合でも、減圧弁の 2 次側圧力 P2 は設定圧力 0.2 MPa に制御されている。

実験③において、末端バルブ V2 を段階的に閉操作して、定流量弁下流側の圧力 P3 を段階的に増加させ、上流側圧力 P2 との圧力差 ΔP を減少させても、その時の流量は設定流量 $0.56 \text{ m}^3/\text{min}$ の近傍に、また減圧弁の 2 次側圧力 P2 も設定圧力 0.2 MPa に制御されている。さらに、末端バルブ V2 を閉操作して、定流量弁の上下流の圧力差がほとんどなくなると、定流量弁の作動圧力 ΔP が確保できなくなり、流量は大きく減少して、定流量機能は作動しなくなる。

実験④において、定流量弁の上下流の圧力差がない状態で、減圧弁上流部のバルブ V1 を閉操作し、流量を最小流量まで減少させると、減圧弁上流側の圧力 P1 は締切圧まで上昇する。

5.3.2 実験 4

図 8 は実験 4 における圧力と流量の変化を示したものであるが、①の実験において、減圧弁の上流側圧力 P1 が段階的に増加しても、その時の流量は設定流量 $0.56 \text{ m}^3/\text{min}$ の

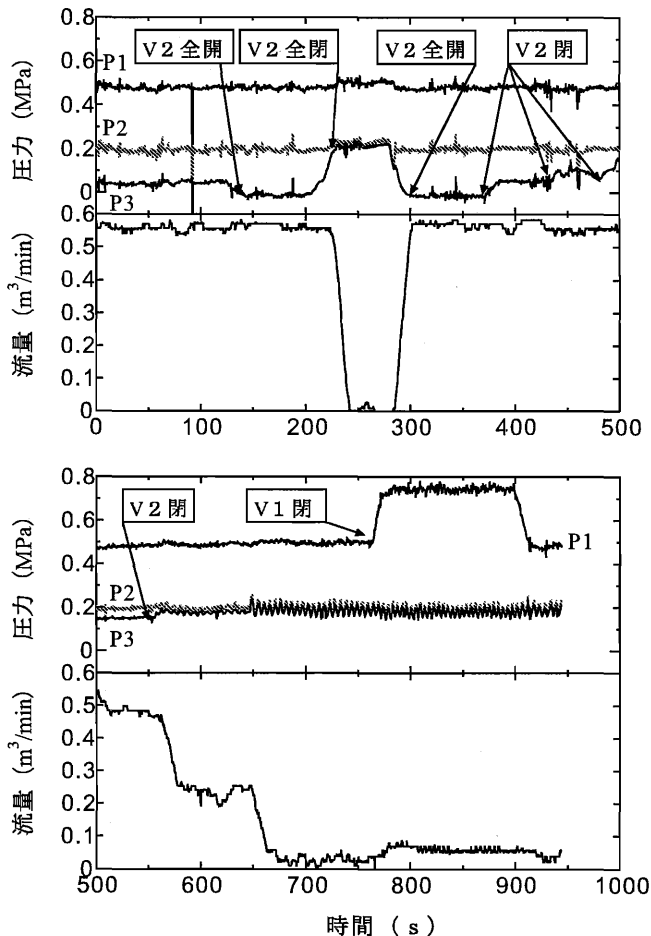


図 7: 圧力と流量の時間変化 (実験 3)

近傍に、また減圧弁の 2 次側圧力 P2 も設定圧力 0.2MPa に制御されている。

実験②において、末端バルブ V2 を閉操作し流量を減少させると、定流量弁下流側の圧力 P3 は増加して、減圧弁の 2 次側圧力 P2 とほぼ同じになっている。その場合でも、減圧弁の 2 次側圧力 P2 は設定圧力 0.2MPa に制御されている。

さらに、実験③において、上流部のバルブ V1 を段階的に開操作しても、末端バルブ V2 の開度が小さく、流量が小さいため、減圧弁 2 次側圧力 P2 と定流量弁 2 次側圧力 P3 はほぼ同じ周期で振動している。減圧弁の 2 次側圧力 P2 は、振動しているものの、設定圧力 0.2MPa 付近にほぼ制御されている。

5.3.3 考察

この結果より考察すると、自動減圧弁と定流量弁を組み合わせ使用した場合、定流量弁の 2 次側の圧力が変化しても、減圧弁の 2 次圧制御は適切に機能すると考えられる。また、定流量弁の作動圧力 ΔP が確保できる範囲においては、定流量弁の流量制御機能も正常に作動し、減圧弁の 2 次側圧力制御に問題となるような影響は及ぼさないと考えられる。

6 まとめ

自動減圧弁と直動式定流量弁を組み合わせたシステムについては、屋内実験パイプラインにおける実験結果からは以下のように整理できる。

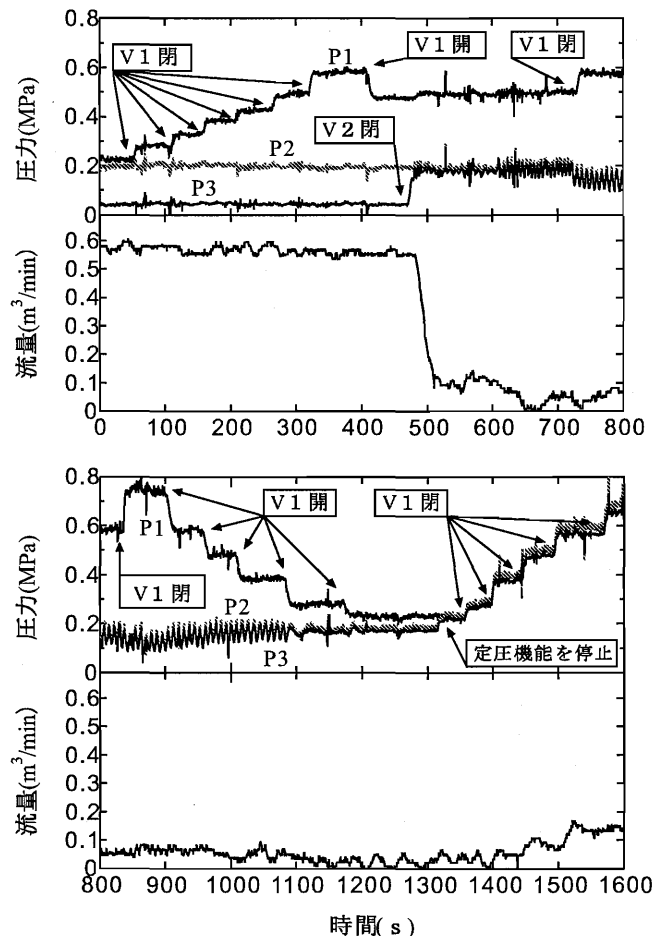


図 8: 圧力と流量の時間変化 (実験 4)

- (1) 自動減圧弁と定流量弁を組み合わせ使用した場合、定流量弁の 2 次側の圧力が変化しても、減圧弁の 2 次圧制御は適切に機能すると考えられる。
- (2) 定流量弁の作動圧力 ΔP が確保できる範囲においては、定流量弁の流量制御機能は正常に作動し、減圧弁の 2 次側圧力制御に問題となるような影響は及ぼさないと考えられる。
- (3) 定流量弁の上下流の圧力差 ΔP がなくなると流量は大きく減少して、定流量機能は作動しなくなる。

現地試験結果 (稲垣ら, 2004a; 稲垣ら, 2004b) によれば、直動式定流量弁を設定流量付近で使用する場合は、管路圧力により弁体を駆動する作動機構が機能して、自励振動を誘発する可能性があることが報告されている。

今回、自動減圧弁と直動式定流量弁を直接に配置した屋内実験パイプラインを使用して、自動減圧弁と直動式定流量弁との連成振動について、実験的な検証を行ったが、自動減圧弁と直動式定流量弁の組み合わせでも各々の機能は適切に発揮され、相互の自励振動は生じていない結果が得られている。これは、実験パイプラインを屋内としたことにより、機器配置は単純化され、複数の機材の影響は排除できたが、延長が約 15m と短く、管路の影響を考慮できなかったことが影響していると考えられる。

この課題については、鹿児島県開聞町の大野岳に施工中 (平成 17 年度完成予定) の実験パイプライン施設にお

いて、引き続き現地実験を行い、自動減圧弁と定流量弁の併用による自励振動の発生について詳細な検証を行う予定である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、京都大学大学院 三野徹教授に貴重なご指導とご助言を賜った。また、現地試験については、関係各位の多大な援助と協力を頂いた。なお、本研究は文部科学省科学研究費基盤 C(14560202)の支援によって行われた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 稲垣仁根・斎藤正樹・奈良大和・竹下伸一・秋吉康弘 (2004a): セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (I)-圧力制御機能の実験的検証-, 雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [2] 稲垣仁根・斎藤正樹・奈良大和・竹下伸一・秋吉康弘 (2004b): セミクローズドパイプラインにおける自動減圧弁と定流量弁の自励振動に関する研究 (II)-定流量弁の作動による振動発生-, 雨水資源化システム学会誌, 投稿中
- [3] 農業土木事業協会 (2000a):かんがいパイプライン機器便覧, pp.162-165.
- [4] 農業土木事業協会 (2000b):かんがいパイプライン機器便覧, pp.122-123.