

令和元年6月20日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K07650

研究課題名(和文) 減圧弁を用いたパイプラインの圧力脈動と疲労破壊の機序解明および防止策の確立

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism of self-excited Pressure Vibration using an Automatic Pressure-Reducing Valve and fatigue failure of pipeline and establishment of preventive measures

研究代表者

稲垣 仁根 (INAGAKI, HITONE)

宮崎大学・農学部・教授

研究者番号：30325732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：減圧弁を用いた低圧化パイプラインにおける自励的圧力脈動の発生について、施設のデータにより管路の固有振動周期を求め、さらに現地実験により得られたデータに基づいて、減圧弁の2次圧制御により、上流部に発生した圧力波の周期を抽出して、自励振動的圧力脈動発生の検証を実施した。この現象は、管路の固有振動周期と減圧弁の設置位置の組み合わせにより、減圧弁の上下流の管路の振動周期が奇数倍の時に、自励振動的圧力脈動が発生することを明らかにした。さらに、自励振動対策としては、サージステッキ等により管路の振動周期を上下流でずらすことが有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

減圧弁を用いた低圧化パイプラインが普及すると、想定外の減圧弁の自励振動が発生して、設計圧力を超える高圧の圧力脈動が減圧弁上流部に生じ、さらに、これが減衰しないため、耐圧強度に余裕のない弁等の機材が破損するなどの事故が発生している。このように、減圧弁を用いた低圧化システムにおいて、これらの管路トラブルのメカニズムの究明と有効な対策を確立することが求められている。低圧化システムの自励振動的な圧力脈動現象の発生は、減圧弁を挟んだ上下流の管路の固有振動周期に起因することを強く示唆する結果が得られた。その結果に基づいて、管路の固有振動周期を用いた自励振動的圧力脈動発生の可能性評価方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a waveform of a self-excited pressure vibration that occurs in low-pressure pipeline systems was analyzed using a pressure-reducing valve. This analysis was conducted on the basis of field measurement data that was obtained for the condition in which the pressure-reducing valve is placed in the middle of the pipeline. On obtaining the intrinsic oscillation period from the transfer matrix and the oscillation period of the field measurement waveform from the spectral analysis, it was clarified that the theoretical period of the intrinsic oscillation of the pipeline approximates the shortest oscillation period based on the measurement data and provides an indication of the periodicity of the pipeline. In addition, the efficacy of the installation of the surge tank and air stick for controlling the pressure oscillation was theoretically and experimentally demonstrated. Based on these results, it was proposed that the occurrence of the self-excited pressure vibration.

研究分野：農業農村工学

キーワード：減圧弁 低圧化パイプライン 固有振動周期 自励振動的圧力脈動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

畑地かんがい地区の自然流下系パイプラインにおいては、受益地に対して必要圧力を保証しながら、設計圧力の最適配分を行うことにより、施設規模の最小化が図られてきた。実際の水路設計においては、地形条件から管路に作用する圧力が下流側ほど大きくなる下り勾配の縦断線形を選択し、一方、使用する管材の面からは、作用圧力の増大する受益地近傍の下流から末端において、耐圧強度は劣るが同口径の鋼管やダクタイル管に比べて経済性に優れた塩化ビニル管を使用することが多いという特徴があった。

このため、管やバルブの破損など管路事故が発生する事例があり、この問題を克服するために、減圧水槽を用いたセミクローズドタイプの採用が困難な地区においては、自動減圧弁を用いて、減圧弁上流側(1次側)の圧力を減圧し、下流側(2次側)の圧力を一定に制御できる低圧化システムが導入された。

導入当初に用いられた自動減圧弁は、従来型の水道用自動減圧弁であり、通水時の減圧が目的であるため、畑地かんがいで求められる静水圧の遮断機能が不十分であった。そのため、下流側圧力の変化に対しての減圧弁の応答遅れが常に発生して、これが緩やかな圧力振動をパイプラインに生じさせた。そこで、従来型減圧弁の作動機構の問題点が現地実験により検証され、エアバッグや安全弁などによる対策を組み込んだ低圧化システムの提案が行われた。

さらに、従来型減圧弁の作動機構が改良され、減圧弁の上流側圧力と下流側圧力をパイロット弁により切り替えて主弁ピストンに作用させる改良型の自動減圧弁が開発された。この改良型の減圧弁は、下流側の圧力変動に対して瞬時的かつ適切量応答するため、下流側(2次側)の圧力制御性が良く、必要とされる止水機能を確保することが可能となった。さらに、減圧弁を複数台の直列配置する場合の安定性の検証や安全弁による水撃圧抑制などについて実験的な研究を行い、具体的な対策の提案が行われている。

このように、自動弁に関する基礎的な技術の集積が進んでおり、パイプラインに各種の自動弁を組み込むことにより、安全性を高める方法は、一般的な技術として確立し、普及させるための準備段階を向かえている。低圧化パイプラインが普及すると、設計時に予測していなかった減圧弁の自励振動が発生して、設計圧力を超える高圧の圧力脈動が減圧弁上流部に生じ、さらに、これが減衰しないため、耐圧強度に余裕のある上流部のダクタイル管や鋼管には深刻な問題が発生しない場合でも、減圧弁や給水栓等の機材が破損するなどの事故が発生している。

このように、減圧弁を用いた低圧化システムにおいて、現場技術者を悩ます事象が多く発生しており、これらの管路トラブルのメカニズムの究明と有効な対策を確立することが求められている。

2. 研究の目的

減圧弁を用いた低圧化パイプラインにおける自励振動的な圧力脈動現象の現地実測データの収集を継続して行っており、収集したデータの一部について試験的な分析を行ったところ、自励振動的な圧力脈動現象の発生は、管路の固有振動周期と減圧弁の設置位置に起因することが強く示唆される結果が得られた。

そこで、本研究は、調査対象地区における減圧弁上下流の管路の固有振動周期を求め、これまでに収集した実測データおよび新たに計測したデータに基づいた振動波形と照らし合わせることで、自励振動発生について詳細な分析を行い、自励振動の発生メカニズムを明らかにし、安全対策を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 自励振動的圧力脈動発生データの収集

減圧弁を用いた低圧化パイプラインにおける自励的圧力脈動の発生について、供用開始後に継続的で過大な自励振動や減圧弁等の破損事故を生じている地区において、圧力変動等のデータの収集を継続して行った。

(2) 現地実測データを用いた圧力波形の分析

減圧弁を用いた低圧化パイプラインにおいて、減圧弁下流側で発生した微小な圧力変動(外乱)は、減圧弁に到達後、瞬間的に減圧弁が閉じたことによって2倍に増幅されて、正圧前進波として上流側に伝達される。このように管路内に発生した微小な圧力変動に減圧弁が反応して、水圧変動を増幅する現象が、水撃波として、管内を往復する間に繰り返され、自励的圧力脈動として増幅・継続することがある。

低圧化システムの中間に減圧弁を組み込み、さらに末端に直動式定流量弁を設置した場合に発生する自励振動的な圧力脈動現象について、現地実測データを用いて圧力波形の分析を行った。

(3) 伝達マトリクス法による固有振動周期の解析

圧力脈動は、減圧弁上下流の管路の固有振動周期が奇数倍の関係にある時に発生すると考えられるので、パイプラインの施設諸元を用いて、管路の固有振動周期と減圧弁の設置位置を求め、自励振動の発生の可能性を検証した。パイプラインシステムは、複雑な境界条件、種々の中間施設、分岐などを含み、また口径や管材が変化するので、管路長と圧力伝播速度によって定まる単純な圧力振動周期を適用できず、伝達マトリクス法によって振動モデルを作成して、固有振動周期を求める。

4. 研究成果

(1) 自励振動的圧力脈動の形成過程

農業用管路では、通水開始、停止、弁による流量・水位制御など頻繁な流量変更操作が多いため、何らかの過渡的な外乱により生じた管内の微小な圧力変化（振動）が発生する場合、この水圧変動に減圧弁が反応して、水圧変動を大きくさせることがある。減圧弁の作動機構の改良が図られ、応答速度が向上した現状においては、この圧力変動が水撃波として、管内を往復する間に振動の振幅が時間経過とともに次第に増大（成長）する自励振動的な圧力脈動現象を生じる可能性がある。

減圧弁については、応答性の向上と自励振動の発生が、トレードオフの関係にあるが、農業用パイプラインにとって、静水圧の遮断は欠くことのできない条件なので、自励振動の発生を回避する、あるいは最小化を図る方法を構築する必要がある。自励振動的圧力脈動の発生および成長のメカニズムについて、外乱に対して瞬間的に応答する減圧弁が、図1に示すような圧力損失のない管路の中間地点に設置され、管路末端でバルブが瞬間的に閉鎖された場合を想定して、シミュレーションを行った。その結果、管路末端で瞬間的に発生した圧力波は、図2に示すように減圧弁に到達後、瞬間的に減圧弁が閉じたことによって2倍に増幅されて、前進波として上流側に伝達される。

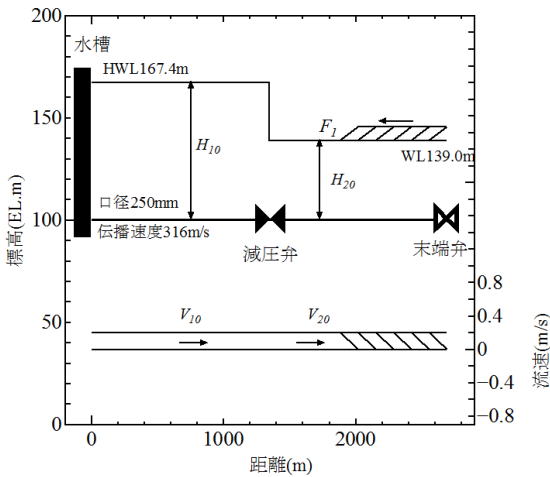


図1 低圧化システムのモデル
($t = 0 \sim L/c$ の水撃圧分布)

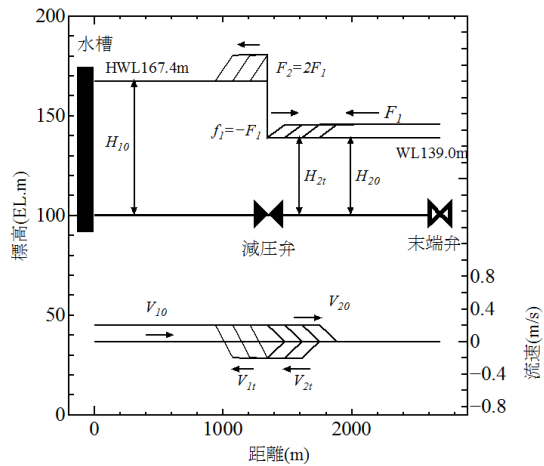


図2: 減圧弁の適切な動作により発生する圧力波
($t = L/c \sim 2L/c$ の水撃圧分布)

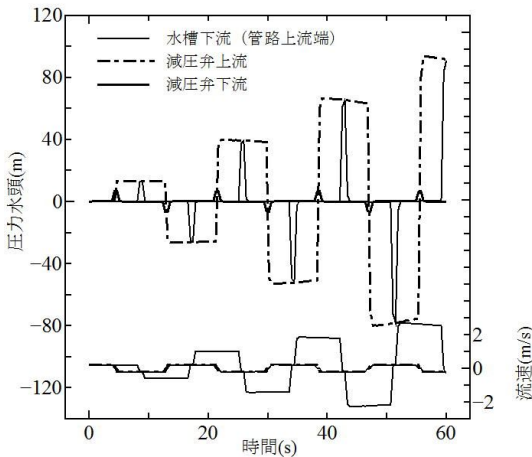


図3: 圧力水頭と流速の時間的变化
(管路摩擦なし)

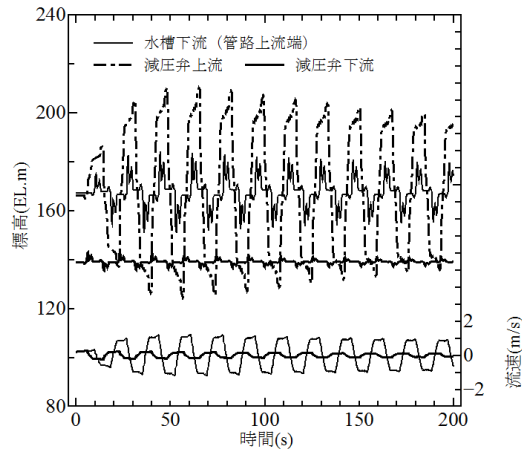


図4: 圧力標高と流速の時間的变化
(管路摩擦あり)

図3に管路圧力水頭と流速の時間的变化を示すが、管路の圧力水頭が、1/2周期毎に位相を反転しながら偶数倍に増加しており、減圧弁の作動による圧力変動が、上流部の管内を往復する間に、圧力波が成長する現象を示している。このように管内に発生した微小な圧力変動に減圧弁が反応して、水圧変動を増幅する現象が水撃波として、管内を往復する間に繰り返され、自励的圧力脈動として成長する結果となる。

実際の流れにおいては、減圧弁の応答遅れによる下流側圧力の上流側への通過や管路の摩擦によるエネルギーの消失があるので、圧力脈動は継続するが、増大しない結果が得られている。そこで、圧力脈動メカニズムの検討モデルを用いて、管路の摩擦損失を考慮した場合について、圧力脈動の発生をシミュレーションにより再現した。摩擦損失を考慮していない場合(図

3)と異なり、図 4 では、脈動の大きさは増加していない。これは、減圧弁による上流側圧力の増幅が、上流管路を伝播する間に摩擦によるエネルギー損失で消費されるためであると考えられる。

(2) 分土工の制御による外乱の発生メカニズム

これまでの低圧化システムにおける圧力脈動の発生メカニズムは、管路末端のバルブを短時間で閉鎖することにより発生する圧力波が起点になり、管路の中間地点に設置された減圧弁がこの圧力波を増幅、継続する機構となっているものであった。従って、低圧化システムにおける自励振動的な圧力脈動現象の発生については、外乱として管路の末端側に圧力波を発生して、低圧化システムに入力することが起点となる。

低圧化システムの末端に直動式の定流量弁を組み込んだ場合、低圧化システムが静止している状態から末端弁を開いて通水を開始すると、通水開始という初期外乱を与えただけで、圧力脈動が発生する結果が得られている。そこで、分土工の制御方式として、直動式定流量弁を使用した方式について、通水開始時における圧力変動を再現し、分土工の制御に起因する外乱の発生メカニズムを検証した。

図 5 に減圧弁下流管路の末端に直動式の流量弁を設置した場合、管路末端の分土工地点における管路流量と圧力標高の関係と通水開始後の圧力水頭と流量の時間的変化を示した。直動式定流量弁の使用を想定する流量境界の場合は、圧力標高と流量は、通水開始後に直線的にバルブ特性曲線に到達し、その後、圧力変動に対応して、バルブ特性をトレースしている。最終的に、圧力と流量が楕円に近い軌跡を繰り返して描いており、自励振動が発生している。また、圧力変動の影響が水位境界に比べて長く残る傾向にある。

従って、直動式定流量弁のように $dA/dH < 0$ ような弁特性を持つ場合、通水開始時などで管路内に水圧変動が発生した時に、弁が圧力変動の駆動装置の働きをして、新たなエネルギーが供給されるので、水撃波が管内を往復しても、摩擦により減衰せず、自励振動が継続する可能性がある。

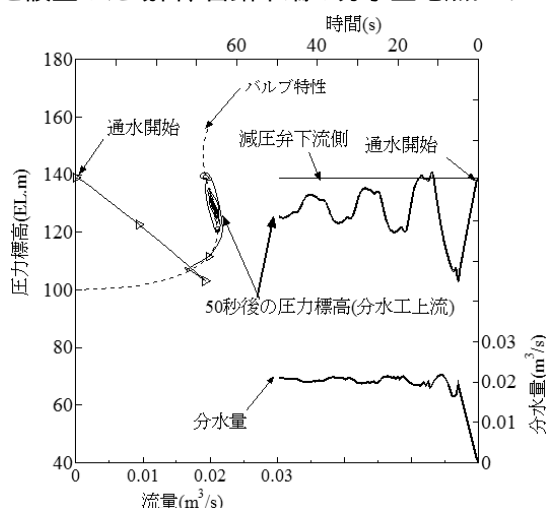


図 5: 分水地点の流量と圧力標高の関係

(3) 現地計測パイプラインの固有振動周期

現地計測パイプラインについて、減圧弁上流部の管路と下流部の管路について、管路・複合部伝達マトリックスを作成して、上下流部の固有振動周期 T_0 を求めた。固有振動周期 T_0 は、上流部は $T_{01}=16.9s$ 、下流部は $T_{02}=15.3s$ であり、実験パイプラインの減圧弁を挟んだ上下流部管路の固有振動周期は、ほぼ等しくなっている。従って、減圧弁の設置位置が管路の中間点であるということは、減圧弁上下流の管路系の圧力振動周期がほぼ等しくなる ($T_{01} \approx T_{02}$) ことを意味する。

(4) 現地計測波形のスペクトル解析

管路の固有振動周期と自励振動的圧力脈動の発生に関連を明確にするために、現地実測データを用いて圧力波形の分析を行った。時系列変動の周期性を分析する手法として、スペクトル解析を適用した。スペクトル解析の手法としては、時系列データを直接フーリエ変換することによってパワースペクトルを得る方法である FTT (高速フーリエ変換) により、計測した圧力波形がどのような周期成分 (スペクトル) を有しているのかを調べた。

圧力履歴をフーリエ解析して、周期と振幅を示すパワースペクトルを図 6 に示すが、振幅は $0.042MPa$ と小さいが、振動周期は、 15.8 秒となり、伝達マトリクスより求められる理論値とほぼ一致する結果が得られている。さらに、本管路系の全体的な周期特性を把握するために、図 7 に、振動周期と振幅の組み合わせを実験条件が異なる毎に示し、同一実験条件における減圧弁の 1 次圧 と 2 次圧 を直線で結んだ。

個々の実験条件は異なるが、全体的な特性としては、以下のように整理できる。

同一実験条件における 1 次圧と 2 次圧、定流量弁地点の周期は、同じである。

周期が小さくなると振幅が大きくなる。

周期が $30s$ 程度になると、振幅は $0.02MPa$ 程度に減少する。

周期が $15s$ 程度で、1 次圧の振幅が最大 $0.21MPa$ となる。

最小の周期は、 $15s$ 程度であり、それ以下の周期は発生していない。

実測による最短振動周期約 $15s$ は、管路情報を基に作成した管路系の伝達マトリクスから得られた振動周期の理論値である減圧弁上流部 $T_{01}=16.9s$ 、下流部 $T_{02}=15.3s$ に近似している。従って、管路の固有振動周期の理論値は、管路系の周期性を示す指標となると考えられる。

また、減圧弁下流側の振動周期が大きくなると、振幅が減少するが、減圧弁上流側の周期、

振幅も同様の傾向を示している。さらに、同一実験条件における1次圧と2次圧の周期が同じであることより、減圧弁の上下流の圧力振動には、強い相関があると考えられる。

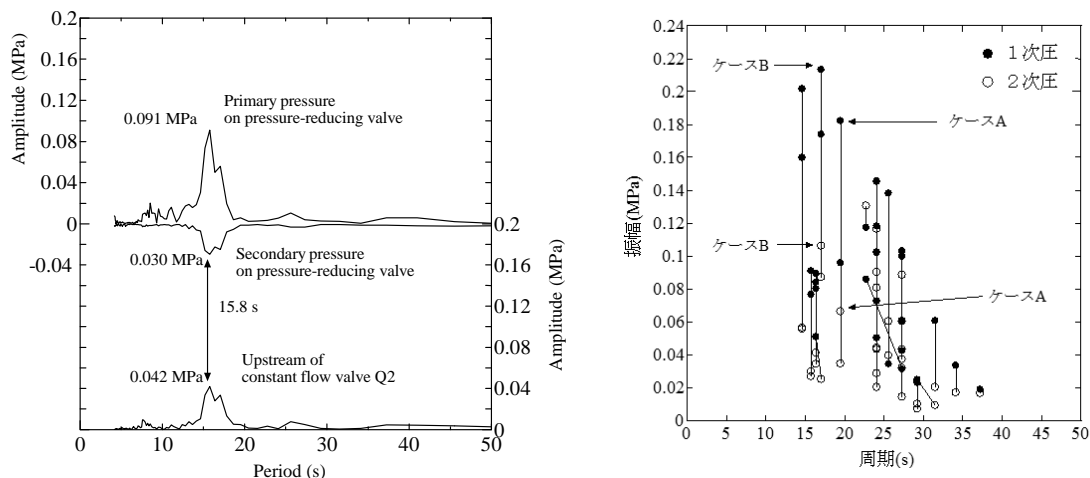


図 6 減圧弁と定流量弁地点のパワースペクトル 図 7 スペクトル解析による振動周期と振幅の関係

(5) 水撃吸収緩和装置による圧力振動抑制効果

減圧弁の直上流や下流端に管路と同規模のサージタンク(相対吸収係数 8.7)を設置すると、実験パイプラインの上下流部の固有振動周期 15~17s を約 2.5 倍に増加させることができる。また、吸収装置が上流端にある場合は、管路全体の振動周期は吸収装置がない場合と同じとなる。従って、サージタンクの位置と規模が管路の圧力振動周期に与える影響を把握し、減圧弁の上下流に適切な位置と規模のサージタンクを配置すれば、管路の圧力振動周期の同期を防ぐことができる。

(6) まとめ

減圧弁を用いた低圧化パイプラインに発生する自励振動的圧力脈動について、以下の条件における現地実測データに基づいて、圧力波形の分析を行った。

- ・パイプラインの中間点に減圧弁を組み込む。
- ・パイプラインの末端に直動式定流量弁を設置する。

その結果、以下のような結果が得られた。

自励振動的圧力脈動の成長メカニズム

減圧弁が管路の中間地点に設置され、減圧弁上下流の管路の固有振動周期が一致する場合は、下流端に過渡的な外乱により生じた管内の微小な圧力変化(振動)が発生すると、この水圧変動に減圧弁が反応して、自励振動を引き起こし、減圧弁の上流管路に圧力脈動を生じさせることがある。その結果、自励振動的な圧力脈動現象の発生は、減圧弁を挟んだ上下流の管路の固有振動周期に起因することが強く示唆される結果が得られた。

外乱の発生メカニズム

直動式定流量弁のように、自励振動を生じる特性のあるバルブが設置されている場合は、管路全体に水撃波と連成した自励振動的な圧力脈動を生じる可能性があると考えられる。

伝達マトリクスによる固有振動周期

管路の伝達マトリクスより求めた減圧弁の上下流部の固有振動周期 T_0 は、減圧弁上流部 $T_{01}=16.9s$ 、下流部 $T_{02}=15.3s$ である。

現地計測波形のスペクトル解析による振動周期

現地計測波形のスペクトル解析より求めた実測データの最短の振動周期は約 15s であり、1次圧の振幅が最大となる。管路の固有振動周期の理論値は、実測データに基づく最短振動周期に近似しており、管路系の周期性を示す指標となる。

1次圧と2次圧の相互相関関数および位相ずれ時間

減圧弁の上下流の圧力(1次圧と2次圧)振動は、固有振動周期の近傍では、相互相関係数が最大、位相ずれ時間が最小となる。減圧弁の1次圧と2次圧は、お互いに相互依存しており、2次圧が減圧弁を介して、1次圧として伝播している。

サージタンクとエアーステッキによる圧力振動抑制効果

減圧弁の上下流に適切な位置と規模のサージタンクを配置すれば、管路の圧力振動周期の同期を防ぐことができる。減圧弁下流側にエアーステッキを設置すると、圧力の振動が水面振動に変換されて、減圧弁の2次側圧力変動が抑制される。

自励振動発生評価法

パイプラインの施設諸元を用いて、固有振動周期に基づく、自励振動的圧力脈動発生の可能性評価方法を提案した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Akiyoshi K., Suzuki Y., Ito H. and Inagaki H. (2018): Self-excited Pressure Vibration in the Low-Pressure Pipeline Using an Automatic Pressure-reducing Valve (II)-Prediction of Occurrence of Self-excited Pressure Vibration Based on a Period of Water Pressure Oscillation in a Closed Conduit-*Journal of Rainwater Catchment Systems, Peer-reviewed*,23(2), pp.1-10.

Akiyoshi K., Suzuki Y., Ito H. and Inagaki H. (2017): Self-excited Pressure Vibration in the Low-Pressure Pipeline Using an Automatic Pressure-reducing Valve (I)-Growth mechanism of self-excited vibrations in the case of installing a pressure-reducing valve at the middle of the pipeline-*Journal of Rainwater Catchment Systems, Peer-reviewed*,23(1), pp.1-10.

〔学会発表〕(計 2 件)

稲垣仁根、Prediction of occurrence of self-excited pressure vibration based on a period of water pressure oscillation in a closed conduit、第25回日本雨水資源化システム学会大会、2017

稲垣仁根、減圧弁を用いた低圧化パイプラインシステムにおける自励振動的圧力脈動、第24回日本雨水資源化システム学会大会、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者