

誘導サイホン作用における管内圧力の解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤村, 和也 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/19702

明治大学大学院理工学研究科

2016 年度

博士学位請求論文

誘導サイホン作用における管内圧力の解析

Analysis of Pneumatic Pressure in Drains on Induced Siphonage

学位請求者 建築学専攻

藤村 和也

はじめに

衛生器具からの排水は、排水管を経て、下水道または浄化槽等に搬送される。この排水の経路は、排水が行われていない場合は、下水管からの、硫化水素・インドールといった有害・悪臭成分が含まれている排水ガスの経路ともなりうる。それらの排水ガスが、器具の排水口から室内へと侵入すると、悪臭を放ち、室内空気の汚染の原因となる。そこで、その問題に対応するために、約2世紀前に排水トラップが登場した。初期のトラップは、金属製の弁・ボールなどの作動による機械式と、単に水をためるだけの水封式の2様式が存在したが、誤作動や耐久性の問題から、前者は廃れ、後者の水封式が現在の主流となった。水封式トラップは封水を保持することにより、排水ガスや衛生害虫の室内への侵入を阻止することができる。その封水が保持される仕組みは、器具などから排水が行われると、その排水の一部が封水となってトラップにたまり、また次の排水により、封水が置き換わるという、きわめて単純なものである。しかしながら、その封水は種々の原因で損失し、その封水損失が進展すると破封という状態に至る。破封とは、封水の水面がトラップのディップのレベルを下回り、空気が常に通過し得る状態をいう。この、破封により、トラップはその排水ガスの遮断機能を失うこととなる。そのため、排水システム的设计においては、トラップを破封させないこと、つまり封水を常時保持させることが重要な必須条件となる。

破封を引き起こす原因としては、自己サイホン作用、誘導サイホン作用、蒸発、毛细管現象などが考えられるが、そのうち最も重要なものが誘導サイホン作用である。誘導サイホン作用とは、複数の衛生器具が横枝管に接続されている場合、または立て管に近接して器具が設置された場合に、他の器具の排水によって生じる管内の負圧によって封水が吸引され、サイホン作用によって封水が損失する現象で、その防止には、排水システム側の管内圧力の制御（緩和）と、トラップの耐圧力性能（管内圧力の変動に対する封水保持性能）が関連してくる。そして、その排水システム側の管内圧力の制御のためには、排水システムの排水能力（許容排水流量）を正確に予測し、排水管径を適切に設計することが重要となる。

空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 218 では、集合住宅で採用されている特殊継手排水システムを主な対象とした、許容排水流量を決定するための排水能力試験法が規定されており、その試験判定基準は、3Hzのローパスフィルター（以下、“LPF”と称す）を施した状態で、各階の排水横枝管において発生する管内圧力変動の最大・最小値が $\pm 400\text{Pa}$ 以内に収まっていること、封水損失が25mm以下であること、という2つの条件が併用されており、この条件はトラップが破封しない限界の条件を示している。このように圧力変動のトラップの封水損失に対する評価は、変動の振幅値に基づいている。

しかしながら、一方で、トラップの性能試験に関する研究が進み、共振現象などの封水振動応答特性が明らかとなり、管内圧力の評価を振幅値のみで行うことは不十分であることがわかった。

また、近年の研究により、排水横枝管にトラップを接続した場合、接続していない場合と比較して、その横枝管に発生する管内圧力変動の最小値が変化するということが明らかとなった。しかしながら、SHASE-S 218で規定されている試験法では、トラップの接続の有無に関する詳細な試験条件は設定されておらず、この条件を明確にしなければ、管内圧力の評価を適切に行うこ

とができないおそれがある。

以上の背景から、本研究では、より適切な管内圧力変動のトラップの封水損失に対する評価法の確立を目的とし、実大排水実験タワー実験を行い、そこで得られた圧力変動と封水変動のデータの解析を行い、圧力波形が封水変動に及ぼす影響、およびトラップの有無が管内圧力変動に及ぼす影響を明らかにした。

誘導サイホン作用における管内圧力の解析
Analysis of Pneumatic Pressure in Drains on Induced Siphonage

目次

はじめに

第1章 序論	1
1.1 研究目的	2
1.2 本論文の構成	2
1.3 既往の研究	4
第2章 本研究に関する基礎事項	8
2.1 トラップに関する基礎事項	9
2.1.1 トラップの形状と種類	
2.1.2 封水深と脚断面積比	
2.1.3 固有振動数	
2.2 管内圧力変動の解析に関する基礎事項	13
2.2.1 スペクトルの概念	
2.2.2 フーリエ・スペクトル	
2.2.3 高速フーリエ変換 (FFT)	
2.2.4 パワースペクトル	
2.2.5 スペクトルの平滑化	
2.3 トラップ封水変動のモデル化に関する基礎事項	19
2.3.1 封水振動とばね振動	
2.3.2 ばね振動における自由振動の運動方程式	
2.4 本論文に関する用語	23

第 3 章	トラップの有無が管内圧力に及ぼす影響	25
3.1	解析目的	26
3.2	実大排水タワー実験の概要	27
3.2.1	実験目的	
3.2.2	実験排水システム	
3.2.3	供試トラップ	
3.2.4	実験方法	
3.3	管内圧力変動の比較	34
3.3.1	解析目的	
3.3.2	解析方法	
3.3.3	解析結果	
3.4	システム最大・最小圧力値の低減率	39
3.4.1	解析目的	
3.4.2	解析方法	
3.4.3	解析結果	
3.5	卓越振動数への影響	49
3.5.1	解析目的	
3.5.2	解析方法	
3.5.3	解析結果	
第 4 章	排水負荷形態が管内圧力変動と封水変動に及ぼす影響	63
4.1	解析目的	64
4.2	実大排水タワー実験の概要	65
4.2.1	実験目的	
4.2.2	実験排水システム	
4.2.3	実験方法供試便器と供試トラップ	
4.2.4	実験方法	
4.3	管内圧力波形と封水変動波形の比較	70
4.3.1	解析目的	
4.3.2	解析方法	
4.3.3	解析結果	
4.4	最大・最小圧力値への影響	74
4.4.1	解析目的	
4.4.2	解析方法	
4.4.3	解析結果	

4.5	最小圧力値と封水損失の関係	82
4.5.1	解析目的	
4.5.2	解析方法	
4.5.3	解析結果	
4.6	トラップの有無による比較	85
4.6.1	管内圧力の比較	
4.6.2	卓越振動数への影響	
第5章	トラップ封水変動の挙動モデル	94
5.1	解析目的	95
5.2	解析方法	95
5.3	解析結果	95
5.3.1	同径トラップにおける封水振動の運動方程式	
5.3.2	異径トラップにおける封水振動の運動方程式	
第6章	結論	109
6.1	本論文のまとめ	110
6.2	今後の課題	114

おわりに

参考文献

付録

第 1 章

序論

1.1 研究目的

SHASE-S 218 では、試験判定基準として定常流量による試験用圧力に対して、許容封水損失が 25mm 以内、許容圧力 $\pm 400\text{Pa}$ の 2 条件が併用されているが、圧力変動に対するトラップの性能試験に関する研究が進み、共振現象などの封水振動応答特性が明らかになり、圧力を振幅値のみで評価することが不十分であることが明らかとなった。更に、実際の排水システムでは、器具排水による負荷がシステムに大きな影響を及ぼすが、試験用圧力には定常流量が採用されているため、実態に即していないことが考えられる。また、SHASE-S218 における試験は封水損失による判定は行わず、管内圧力による判定のみを行う場合がほとんどである。しかしながら、近年の研究により、排水システムにトラップを接続することにより、その横枝管に発生する最小圧力値が変化するということが明らかとなった。

そこで、本研究では、より適切な封水損失に対する管内圧力の評価基準を定めるための基礎研究として、トラップ接続の有無が管内圧力に及ぼす影響の解析と排水負荷形態が管内圧力に及ぼす影響の検討を行った。

1.2 研究概要

本論文の構成を以下に記す。

第1章 序論

本研究の目的と概要、およびその流れについて述べている。また、本研究に関連する既往の研究を紹介している。

第2章 本研究に関する基礎事項

本研究で使用するトラップ、および実管内圧力の解析に関する基礎事項について述べている。また、本研究における用語の解説を行った。

第3章 トラップの有無が管内圧力に及ぼす影響

第3章では、実大排水実験タワーを用いて、Pトラップ、逆わんトラップ、および大便器を供試トラップとした定常流量排水負荷実験を行い、トラップの接続の有無が管内圧力に及ぼす影響の解析を行った。

第4章 排水負荷形態が管内圧力変動と封水変動に及ぼす影響

第4章では、実大排水実験タワーを用いて、定常流量排水負荷実験と器具排水負荷実験を行い、排水負荷形態が管内圧力変動と封水変動に及ぼす影響を解析した。

第5章 トラップ封水変動の挙動モデル

トラップの封水変動を一次自由度系振動とみなし、強制振動に対する挙動の数学モデルの作成を行い、実測値との比較を行った。

第6章 結論

本研究のまとめと、今後の課題について述べた。

1.3 既往の研究

空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S218「集合住宅の排水立て管システムの排水能力試験法」では、排水能力を判断する指標としてトラップの封水損失と管内圧力が併用されている。既往の研究では、主にトラップ封水と管内圧力の関係及びトラップの耐圧力性能の評価に関する研究が行われてきた。本節では、管内圧力に対するトラップ封水の応答特性に関する研究について取りまとめた。

精密試験装置に関する既往研究

(1) 精密試験装置の開発に関する研究^{1),2),3),4)}

1997年に塚越らは、精密試験装置の空気チャンバーの気密性に関する実験と、装置の動特性に関する実験を行い、空気チャンバーの気密性にはまだ問題があるが、連続的な正弦波を確実にできることが明らかとなった。

1997年に坂上らは、精密試験装置を用いて実大排水実験タワーで測定した排水管内圧力データを使用し、その再現圧力と比較し、定常成分を除いた管内圧力変動を再現できることを確認した。

1998年に岩間らは、改善を加えた空気チャンバーの気密性実験を行った。試験装置の変更は気密性を前回よりも大幅に向上させたが、本研究の目的には至らなかった。また、チャンバー内の気体の圧縮性を加味した理論圧力計算式は、有用であることが確認された。

1998年に王らは実大排水実験タワーで得られた管内圧力データを再現させるための実験を行い圧力補助装置を付置した本トラップ性能試験装置を用いることにより、トラップ封水の共振現象に最も影響を与える実管内圧力の定常成分の再現ができることが確認した。

(2) 再現圧力波に関する研究^{8),12),14),16),17)}

2000年に黒田らは排水実験タワーで、単独接続実験、4トラップ同時接続実験（大便器を除く）、5トラップ同時接続実験（23階のみ）実管内圧力波と実封水変動を測定し、単独接続試験においてすべてのトラップで良好に行うことができると言え、複数同時接続試験においてはやや再現性は劣るものの、封水変動試験を行う能力を十分に有していると確認された。

2004年に張らは、実管内圧力波をFFT処理してパワースペクトル密度分布を作成し、上位3つの卓越パワースペクトルの周波数を用いて4つの合成波を作り出しトラップ性能試験装置で再現し、実管内圧力波による封水損失に最も近い値を示したのは合成波[P_{cen}]であることが確認した。

2003年に張らは、トラップ性能試験装置に正圧側の実管内圧力データを入力しその封水変動が実際の封水変動と一致するかの実験を行い、排水実験タワーを用いて収録した管内圧力変動と床排水トラップおよびPトラップの封水変動のデータについて、トラップ性能試験装置管内圧力変動データを入力し、封水変動を測定した。その結果、圧力波形の入力に制限などにより、加圧直後の封水変動は異なるものの、約10秒後からの変動はほぼ一致

しており、性能試験装置による再現性が確認された。

2005年に張らは、6種類のトラップを対象に、排水実験タワーおよびトラップ試験装置を用いて、トラップの封水振動実験を行った。バイアスを加えた性能試験装置での実験結果は、実験タワーのそれとほぼ一致することから実管内圧力を再現できることが確認された。

排水タワー実験に関する既往研究

(1) 排水実験タワーの管内圧力の垂直分布に関する研究⁶⁾

1999年に岩間らは、実大排水実験タワーで得られた管内圧力データを解析した。その結果、再現性は良好であり、標準偏差は、負荷流量が多くなるに従って大きくなり、下層になるに従って変動強度の垂直分布は大きくなる傾向が明らかであることを確認した。

(2) 圧力波データの解析に関する研究¹⁷⁾

2006年に張らは、排水実験タワーを所有する大学・メーカーよりサンプリング周波数50Hzの圧力データを入手し、系統的な解析を行った。その結果、 P_{ave} が一定の場合、周波数 f および係数 k_f の組み合わせがトラップの封水損失に及ぼす影響は小さく、わんトラップでは、管内圧力最小値が-400Paで封水損失が25mmを超えた。そして、実管内圧力に比べ、試験用圧力波を用いた場合の方が封水損失が大きいことを確認した。

トラップ性能評価に関する既往研究

(1) 各種トラップの耐圧力性能に関する研究^{5),6),7),9),10),11),15),21),22),25)}

1998年に正久らは、精密試験装置を用いて6種類の供試トラップ(P・Sトラップ、W.Cトラップ、わんトラップ、逆わんトラップA、逆わんトラップB)の満水時、半水時における固有振動数の測定と、正弦波圧力による振動実験を行った。その結果、逆わんトラップの破封振動数は固有振動数遷移内でないことが確認された。また、PトラップとSトラップはほぼ同じ特性を持ち、ウエアの違いからSトラップのほうが多少破封しやすいこと、W.Cトラップだけでは、極小値が2つ存在するという、特異な性質を持っていること、脚断面積比の小さい逆わんトラップAのほうが、大きい逆わんトラップBよりも破封しやすいことが確認された。

1999年に岩間らは、5種類のトラップについて、正弦波による破封特性から求めた破封振動数、算定式から求めた固有振動数および再現圧力による封水応答から求めた伝達関数により、振動特性を検討した。その結果、P、Sトラップではグラフの谷が深く、固有振動数が明確に表れているのに対し、逆わんトラップの場合は明確でないことが確認された。

1999年に王らは、実管内圧力波をトラップの負荷する実験を行い、封水の耐圧力性能について実験を行った。その結果、代表固有振動数における代表パワーは封水損失に大きな影響を与えることが確認された。また、P・S・逆わんトラップでは代表パワーが大きくなるにつれて、破封を生じさせる最大負圧が小さくなること、わん・ボルトトラップでは代

表パワーによる明確な影響が確認されず、最大負圧のみで破封が生じるかどうかが決まること、ボトル・わん・逆わんトラップ脚断面積比が大きくなるにつれて、耐管内圧力性能は大きくなることが確認された。

2004年に張らは、複雑な構造を有する4種類のバリアフリー用ユニットバスの床排水トラップを用いた実験を行い、どのトラップも明確な瞬時振動数を持たないことや、一般のトラップと異なり、破封振動数と固有振動数との間に、既往研究で示されたような明確な関係はないこと、SHASE-S218で定義された最大・最小圧力 $\pm 400\text{Pa}$ では封水損失は25mm以下であることを確認した。

2008年に郷らは、試験用圧力波を使用し、様々な排水トラップについて、特に脚断面積比、封水量に着目した実験を行った。供試トラップは、脚断面積比の異なる多種類のものがあるわんトラップ9種、逆わんトラップ11種の計21種のトラップを用いた。すべての供試トラップについて封水損失と最小圧力値には非常に強い相関がみられ、脚断面積比が大きいほど、耐圧力性能が高いことが示され、脚断面積比が耐圧力性能に及ぼす影響は、わんトラップの方が逆わんトラップよりも大きいものとなったことが確認された。

2008年に柳澤らは、トラップの基本動特性と圧力データを関連付けた系統的な解析を行った。その結果、Sトラップの応答倍率が、特定の振動数付近で急激に増加するのに対し、わんトラップ・逆わんトラップは、応答倍率に対する単正弦波圧力の振動数の影響が小さいことが確認された。

2009年に郷らは、耐圧力性能に最も影響力があると思われる脚断面積比Fに着目し、試作透明トラップで脚断面積比を変化させながら、トラップの破封特性について検討した。その結果、脚断面積比Fが大きいほど、破封水量は小さくなり、耐圧力性能が高くなることが確認された。

(2) 正圧側での圧力波形に関する研究^{13),14)}

2002年に張らは、14階建ての排水実験タワーに特殊断手排水システムを設置して得られた1階のデータについて、その圧力波形をトラップの性能試験装置に入力し、8種類のトラップを供試トラップとして圧力付加実験を行った。その結果、最大圧力値と封水損失の関係は、必ずしも直線関係にはならないこと、逆わんトラップは正圧側では比較的耐圧力性能の高いトラップといえることが確認された。

2003年には張らは、トラップ性能試験装置を用いて、定常成分の圧力値（バイアス値）を設定し、これに正弦波を加えた試験圧力波の作成を行い、8種類の供試トラップに圧力付加実験を行い、瞬時破封圧力、瞬時破封振動数を求めた。その結果、バイアス値が大きいほど、瞬時破封圧力は大きくなるが、負圧側でのバイアス値の影響は小さく、バイアス値が大きいほど、一般に瞬時破封振動数は小さくなる傾向にあるが、サイホンゼット式大便器では逆の傾向にあった。そして、瞬時破封振動数は、バイアス値を変化させてもすべて3Hz以下であり、HASS218で3Hzローパスフィルターをかけた圧力を排水能力の判定条件としていることはほぼ妥当であると確認された。

簡易試験装置に関する研究

(1) 簡易試験装置の開発に関する研究¹⁸⁾

2006年に光永らは、簡易型試験装置の正弦圧力の再現性を確認し、実験により、使用する測定器をスケールありの容量水量計とし、固有振動数を測定する方法が、自由振動実験を行う上で最も有効であることを確認した。

(2) 再現圧力波に関する研究^{19),20)}

2007年に張らは、封水損失と相関の高い排水管内圧力特性値を調べるため、排水実験タワーで得られた圧力測定データのうち、負圧側で最もトラップの封水損失にとって厳しい条件となるシステム最小圧力発生階のデータで、3Hzローパスフィルターをかけた圧力の最小値が大略-200～-600Paのものを選び出し、トラップ性能試験装置を用いて封水損失に関する実験を行った。

2007年に栗山らは、簡易型試験装置を用いた新しいトラップの性能評価法として、実管内圧力波の上位3つの卓越パワースペクトルにおける振動数による3正弦波と、単正弦波を用いた実験の検討を行った。それと同時に、この方法を用いた場合に精密型試験装置から得られる結果と簡易型試験装置から得られる結果を比較し、簡易型試験装置の有効性の検討も行った。その結果、3正弦波実験がトラップの性能の試験法として有用であるとの指針が得られた。

(3) 簡易試験装置を用いた試験法に関する研究^{23),24),26)}

2008年に柳澤らは、6つの3正弦波圧力を作成し、簡易試験装置を用いた実験を行った。その結果、本装置を用いた3正弦波圧力の有用性が確認されるとともに、3正弦波圧力の作成条件が得られた。

2009年に栗山らは、より簡便で汎用的な排水トラップの耐圧力性能試験法の確立を目的として、単正弦波による4種類の実験を行い、実験手順の簡便性と実験結果の比較・検討を行い、 $\sqrt{2}$ 倍振動数応答実験は、試験法としては適さないことを明らかにした。

2010年に森村らは、P、S、わん、逆わんトラップを対象として、単正弦波を用いた簡易試験法を検討するとともに、超節水型便器の性能を評価した。その結果、水位計を用いたディップレベルを基準とした破封判断Bによる方法は、管トラップ(P、Sトラップ)には有効であることが明らかとなり、隔壁トラップ(わん、逆わんトラップ)に対しては気泡通過時に表面水位が不安定となることから、不適切であることを確認した。また、節水型便器の性能については、水位の位置による固有振動数への影響は極めて少なく、初期封水位が低下するに従って、破封しやすくなることが確認された。

第 2 章

本研究に関する基礎事項

2.1 トラップに関する基礎事項

2.1.1 トラップの種類と形状

トラップとは、排水の流れに支障を与えることなく、排水管内の空気が排水口を通して室内に侵入することを阻止できるものをいう。

トラップの阻止機能は、主として封水によるものと、弁やボールによるものがあり、狭義には前者を水封式トラップ、後者をメカニカルトラップという。現在では水封式トラップが一般的となっており、「排水トラップ」と称した場合、水封式トラップを指すことが一般的である。水封式トラップの各部位の名称を図 2.1-1 に、トラップの各種形状を図 2.1-2 に示す。メカニカルトラップの各部位の名称は、阻止機構の形状により異なるため割愛する。トラップには、次のような種類がある。

1) 阻止機構による分類

- ①水封式トラップ
- ②メカニカルトラップ

2) 用途による分類

- ①器具トラップ（作りつけトラップを含む）
- ②床排水トラップ
- ③雨水用トラップ
- ④トラップ枡

3) 形状による分類

[管トラップ]

- (a) P トラップ
- (b) S トラップ
- (c) U トラップ

[隔壁トラップ]

- (d) わんトラップ
- (e) 逆わんトラップ
- (f) ボトルトラップ

[阻集トラップ]

- (g) ドラムトラップ

器具トラップ：衛生器具に付属し、それぞれに適した形状・構造をもったトラップ。

作りつけトラップ：水受け容器と一体成形されたトラップ。

床排水トラップ：床排水口にトラップ機構を内蔵したもの、および床排水口に接続して用いられるトラップ。

雨水用トラップ：雨水管を污水管または雑排水管に連結する場合、雨水管に設けるトラップ。一般的には、U トラップまたはトラップ枡を用いる。

トラップ枡：排水ますの底部に水ため部を設け、流出管の先端を水ため部に水没させて、トラップ構造を形成した枡。

隔壁トラップ：トラップの水封部分が隔板や隔壁により構成されているもの。

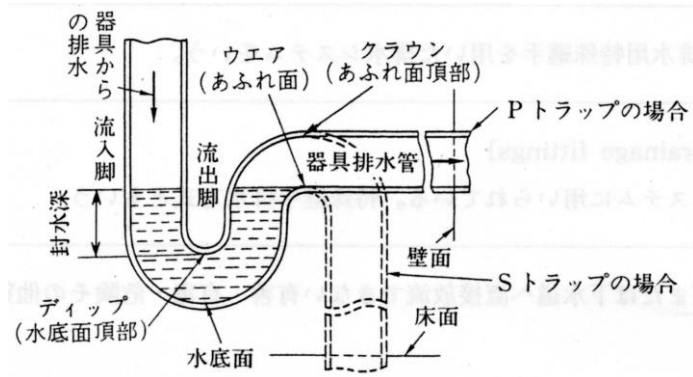


図 2.1-1 トラップの各部位の名称

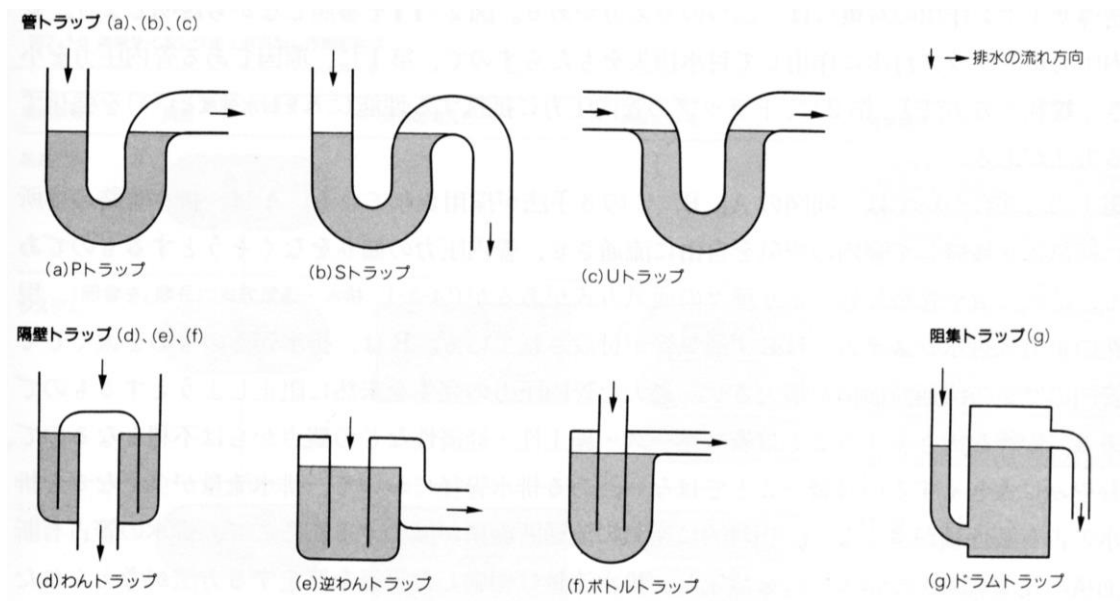


図 2.1-2 トラップの各種形状

2.1.2 トラップの基礎特性値

本節では、水封式トラップの基礎特性値である封水深と脚断面積比および固有振動数について述べる。メカニカルトラップの基本特性値は、阻止機構によって異なってくるため、割愛する。

(1) 封水深と脚断面積比

トラップの封水深は、ディップとウェアとの間の垂直距離に等しく、封水深を構成する部分のうち、器具側の部位を流入脚、器具排水管側の部位を流出脚という。一般に、封水深が大きいほどトラップの耐圧力性能は向上し、封水深は、建設省告示第 1597 号（改訂同告示 1674 号）に、最小 5cm 以上最大 10cm 以下と規定されている。最小封水深は、許容管内圧力±400Pa に基づいて規定されており、最大封水深は、封水深が深いほど、排水混入物がトラップに取り残される危険性が増加し、トラップの自掃作用（自掃力）が低下することから規定された。器具トラップは、床上にあるので、容易に封水深を深くすることができるが、床排水トラップの場合は、封水深を深くすることが難しく、最小封水深ぎりぎりの封水深とするのが通例である。

トラップの脚断面積比は、平均流入脚断面積に対する平均流出脚断面積の比をいう。現在のところ、脚断面積比に関する規定はないが、一般に、脚断面積比が大きいほどトラップの耐圧力性能は大きくなることから、両脚が同径の場合の値 1.0 を基準として、それより小さいトラップは封水深を深くするなどの配慮が必要と思われる。

封水深と脚断面積比の基準値は、以下のように規定する。

- 1) 脚断面積比 F は、原則として 1.0 以上とする。ただし、次の a) または b) の場合は、1.0 未満とすることができる。
 - (a) 式 2.1-6 で定義される封水深 H_f を有する場合。
 - (b) 封水損失 H_0 を少なくする機構を有する場合。この場合、トラップの耐圧力性能試験法による性能標準値を上回ること。
- 2) 脚断面積比 F は、半封水深 ($0.5 H_f$) 以下の封水部分の平均値とする。

$$F = A_2 / A_1 \quad (2.1-1)$$

ここに、

A_2 : 半封水深以下の平均流出脚断面積

A_1 : 半封水深以下の平均流入脚断面積

[H_f の算定式]

封水深 (H_{50}) 相当の負圧 ($P_{50} = 9.8 H_{50} [\text{Pa}]$) が作用したとき、

$$\text{残留封水深: } H_R = P_{50} \times F / (1 + F) \quad (2.1-2)$$

$$\text{封水損失: } H_0 = P_{50} / (1 + F) \quad (2.1-3)$$

F=1 のときの残留封水深を基準とすると、

$$F=1 \text{ のとき、} H_{R1}=(1/2)H_{50} \quad (2.1-4)$$

$$F=F \text{ のとき、} H_{RF}=\{F/(1+F)\} H_i \quad (2.1-5)$$

$H_{R1}=H_{RF}$ とすれば、次より H_i が求められる。

$$H_i = \{(1+F)/(2F)\} H_{50} \quad (\text{小数点以下は切り上げ}) \quad (2.1-6)$$

例) $F=0.9$ のとき、 $H_{R0.9} = 52.78 = 53\text{mm}$

$F=0.8$ のとき、 $H_{R0.8} = 56.25 = 57\text{mm}$

$F=0.7$ のとき、 $H_{R0.7} = 60.71 = 61\text{mm}$

$F=0.6$ のとき、 $H_{R0.6} = 66.67 = 67\text{mm}$

(2) 固有振動数

すべての物体は、ある固有の振動を持っており、その時の振動数を固有振動数という。トラップ封水において、固有振動数は封水長によって決定される。封水長が短くなると固有振動数は上昇し、逆に、長くなると固有振動数は低下する。固有振動数に合わせて外部から周期的な力を加えると、共振現象が生じて振動の振幅が急に大きくなり、さまざまな問題が発生するため、振動対策上最も重要なパラメーターの一つといえる。

(3) 破封

破封には、以下に示すように常時破封（完全破封）と瞬時破封の 2 種類がある。本研究では、破封の判断として主に瞬時破封を用いている。

- 1) 瞬時破封 : 封水変動時、瞬時に気泡がディップを通過する状態
- 2) 常時破封 (完全破封) : 封水変動後の静止状態において、封水面がディップより下位のレベルになる状態

2.2 管内圧力変動の解析に関する基礎事項

本節では、排水管内の圧力変動特性、および圧力変動がトラップ封水に及ぼす影響を検討する際に用いるスペクトル解析の理論について述べる。

2.2.1 スペクトルの概念

スペクトルを一般的に定義すると、「複雑な組成を持つものを単純な成分に分解し、その成分を、それを特徴付けるある量の大小の順にしたがって並べたもの」である。

例えば、太陽光線は、一見するとなんの色もない白色光であるが、プリズムを通過すると7色（赤・橙・黄・緑・青・藍・紫 — 波長 約 8000 Å ~ 4000 Å）に分解される。

本研究は、解析の対象が管内圧力である。つまり、排水管内に生じる圧力変動を、振動波として捉え、その中に含まれるどんな振動数成分の圧力波が、トラップ封水に影響するかを明らかにするために、スペクトル解析を行い、排水管内の圧力変動特性を検討する。

2.2.2 フーリエ・スペクトル

ある振動波に含まれる各成分の振動数と振幅の関係を描いたグラフをフーリエ・スペクトルという。振動波の時系列データからは、その振動波がどんな振動数成分の波から成り立ち、どのような成分のものが卓越しているのか、または、その波のエネルギーについては明らかでない。それを明らかにするのがフーリエ・スペクトルである。

本研究におけるスペクトル解析の目的は、複雑な管内圧力の振動波の時系列データを、時間領域から周波数領域へ変換し、振動数成分を検出することで、圧力変動がトラップ封水に与える影響を検討する際の手掛かりを得ることである。以下に、フーリエ・スペクトルの基本概念を説明する。

ある時間関数 $x(t)$ の等間隔の標本値 x_m ($m=1,2,\dots,N-1$) が与えられたとき、標本数を N 、標本点間隔を Δt とすれば、

$$x_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left(A_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right) + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(N/2)t}{N\Delta t}$$
$$A_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos \frac{2\pi km}{N} \quad (k=1,2,\dots,N/2-1,N/2) \quad (2.2-1)$$
$$B_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sin \frac{2\pi km}{N} \quad (k=1,2,\dots,N/2-1)$$

となり、 x_m は A_k, B_k (有限フーリエ係数という) を係数とする有限三角級数で表される。

ここで、

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t} \quad (2.2-2)$$

とおくと、 x_m における最も高次の振動数 $f_{N/2}$ は、

$$f_{N/2} = \frac{(N/2)}{N\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (2.2-3)$$

となり、これが振動数成分を検出できる限界（分解能）である。この振動数 $f_{N/2}$ をナイキスト振動数という。

また、

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (2.2-4)$$

とすれば、 X_k は、 k 次成分の振幅を表す。これらの各成分の振動数と振幅との関係を描いたグラフをフーリエ・スペクトルという。

2.2.3 高速フーリエ変換 (FFT)

高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform、略して FFT) と呼ばれる手法は、等間隔の標本点における N 個の標本値の数列 x_m について、有限複素フーリエ係数 C_k ($k=1,2,\dots,N-1$) を求めることを目的とする。ここで、標本値の個数が2の累乗であると、本手法が最も威力を発揮する。

まず、 N 個の標本値からなる数列 x_m を、次のように、番号 m が偶数のものと奇数のものに分解する。

$$y_m = x_{2j} \quad (j=0,1,2,\dots,N/2-1) \quad (2.2-5)$$

$$z_m = x_{2j+1}$$

これらのそれぞれのフーリエ変換は、

$$Y_k^{(N/2)} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i\{2\pi km/(N/2)\}} \quad (k=0,1,2,\dots,N/2-1) \quad (2.2-6)$$

$$Z_k^{(N/2)} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} z_m e^{-i\{2\pi km/(N/2)\}}$$

である。ここで、係数 Y_k 、 Z_k の肩に付けてある()は、数列の要素の個数であり、また、その数列のフーリエ変換によって求められる複素フーリエ係数の個数を表している。

ところで、

$$C_k^{(N)} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km/N)} \quad (2.2-7)$$

であるが、 $x_m = y_m + z_m$ であるから、上式の右辺は y_m 、 z_m についてフーリエ変換を行った上で、足し合わせても良い。したがって、上式は、

$$C_k^{(N)} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} [y_m e^{-i(2\pi k(2m)/N)} + z_m e^{-i(2\pi k(2m+1)/N)}] \quad (2.2-8)$$

である。この式を変形すれば、

$$\begin{aligned} C_k^{(N)} &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i(2\pi km/(N/2))} + e^{-i\{\pi k/(N/2)\}} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} z_m e^{-i(2\pi km/(N/2))} \\ &= \frac{1}{2} Y_k^{(N/2)} + \frac{1}{2} e^{-i\{\pi k/(N/2)\}} Z_k^{(N/2)} \quad (k=0,1,2,\dots, N/2-1) \end{aligned} \quad (2.2-9)$$

となる。さらに、 k の代わりに $k+N/2$ とすると、

$$\begin{aligned} Y_{k+N/2}^{(N/2)} &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i(2\pi(k+N/2)m/(N/2))} \\ &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i(2\pi km/(N/2)+2\pi m)} \\ &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i(2\pi km/(N/2)+2\pi m)} \end{aligned} \quad (2.2-10)$$

ここで、オイラーの定理より、 $e^{-i(2\pi m)} = \cos 2\pi m - i \sin 2\pi m = 1$ であるから、

$$\begin{aligned} Y_{k+N/2}^{(N/2)} &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N/2-1} y_m e^{-i(2\pi km/(N/2))} \\ &= Y_k^{(N/2)} \end{aligned} \quad (2.2-11)$$

同様にして、 $Z_{k+N/2}^{(N/2)} = Z_k^{(N/2)}$ となる。

したがって、

$$\begin{aligned} C_{k+N/2}^{(N)} &= \frac{1}{2} Y_{k+N/2}^{(N/2)} + \frac{1}{2} e^{-i\{\pi(k+N/2)/(N/2)\}} Z_{k+N/2}^{(N/2)} \\ &= \frac{1}{2} Y_{k+N/2}^{(N/2)} + \frac{1}{2} e^{-i\{\pi k/(N/2)\}} e^{-i\pi} Z_{k+N/2}^{(N/2)} \end{aligned} \quad (2.2-12)$$

ここで、オイラーの定理より、 $e^{-i\pi} = \cos \pi - i \sin \pi = -1$ であるから、

$$C_{k+N/2}^{(N)} = \frac{1}{2} Y_k^{(N/2)} - \frac{1}{2} e^{-i\{\pi k/(N/2)\}} Z_k^{(N/2)} \quad (2.2-13)$$

となる。以上をまとめると、

$$2C_k^{(N)} = Y_k^{(N/2)} + e^{i\{-\pi k/(N/2)\}} Z_k^{(N/2)} \quad (k=0,1,2,\dots,N/2-1) \quad (2.2-14)$$

$$2C_{k+N/2}^{(N)} = Y_k^{(N/2)} - e^{i\{-\pi k/(N/2)\}} Z_k^{(N/2)}$$

となる。上式より、数列 x_m のフーリエ変換が、分割した半分ずつの数列 y_m 、 z_m のフーリエ変換から、簡単に計算できることが分かる。全く同様の方法で、データ長が $N=2^p$ の数列 x_m を P 回分割すると、分割された数列の要素はすべて 1 個ずつになってしまう。要素が 1 個だけのフーリエ変換は、その要素そのものである。そこで、次は逆の順序をたどりながら、次々に上位のフーリエ変換に合成していくと、 P 回の操作で、求めるフーリエ変換 C_k の値が求められる。以上が、高速フーリエ変換 (FFT) の原理である。

2.2.4 パワースペクトル

ある時間関数 $x(t)$ の等間隔の標本値 x_m が N 個 ($m=1,2,\dots,N-1$) 与えられたとき、標本値の 2 乗の平均は

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2$$

であり、この値を平均パワーという。この平均パワーを有限複素フーリエ係数 C_k で表すと、

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |C_k|^2 \quad (2.2-15)$$

となる。ここで、有限複素フーリエ係数 C_k には

$$C_{N-k} = C_k^* \quad (k=1,2,\dots, N/2-1) \quad (2.2-16)$$

という性質がある (*は共役複素数を表す)。これを利用すると平均パワーの式は、

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} |C_k|^2 + |C_{N/2}|^2 \quad (2.2-17)$$

と書くことができる。この式は、次に示すパーセヴァル (Parseval) の定理に等しい。

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{X_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} X_k^2 + \frac{X_{N/2}^2}{2} \right) \quad (2.2-18)$$

式 2.2-17 は、振動波の平均パワーを各成分波の寄与に分解したものである。したがって、式 2.2-17 の右辺の各項をそれぞれの成分波の振動数に対して描くと、平均パワーのうち、どの成分に属するものが大きいかが確認できる図が得られる。しかし通常は、式 2.2-17 の両辺に、振動波の継続時間 $T = N\Delta t$ を乗じて、

$$\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \cdot \Delta t = T |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} (T |C_k|)^2 + T |C_{N/2}|^2 \quad (2.2-19)$$

とし、式 2.2-17 の右辺の各項を

$$k=1,2,\dots, N/2-1$$

$$f_k = k\Delta f \quad (2.2-20)$$

$$\omega_k = 2\pi k\Delta f$$

などに対して描いた図をパワースペクトル密度分布と呼んでいる。

2.2.5 スペクトルの平滑化

地震動のような不規則振動のパワースペクトル密度分布は、そのままでは傾向を読み取りにくい。そのため、スペクトルを滑らかにする (平滑化する) ことで、大まかな傾向を調べることがある。その最も単純な方法の一つとして、移動平均法という手法がある。移動平均法とは、ある標本点を中心に、適当な幅の中にある標本値の平均を求め、その値を中心点における標本値とし、この計算を、中心点を次々にずらしながら行っていくものである。

パワースペクトルを $G(f)$ とし、これに、ある振動数関数を乗じながら移動平均をとって

いくものとすれば、平滑化されたパワースペクトルは、次の合積で表すことができる。

$$\bar{G}(f) = \int G(g) \cdot W(f - g) dg \quad (2.2-21)$$

(ただし、 g は積分すると消えてしまう媒介変数とする)

ここで、 $W(f)$ をスペクトル・ウィンドウという。

平滑化を行う際には、元波形のもつパワー、すなわちパワースペクトルの面積を変えないこと（面積不変性）と、ある点における平均値を求めるときに、その両側の値の扱いに不均衡が生じないこと（左右対称性）が求められる。このことを式で表すと、次のようになる。

$$\int W(f) df = 1 \quad (2.2-22)$$

$$W(f) = W(-f)$$

上述のような条件を有する関数は無数にあるため、スペクトル・ウィンドウはいくらでも作ることができ、多くの研究者によって、さまざまな種類のウィンドウが提案されている。以下に、実際によく使われているものをいくつか示す。なお、各式中の b は、ウィンドウの幅（バンド幅）を示す定数であり、 b が大きいほど平均をとる範囲が広くなり、パワースペクトルはより平滑にされる。

1) 長方形ウィンドウ

$$W(f) = \frac{\sin 2\pi b f}{\pi f} \quad (2.2-23)$$

2) ハニング (Hanning) ウィンドウ

$$W(f) = 0.50 \times \frac{\sin 2\pi b f}{\pi f} - 0.25 \times \frac{8b^2 f}{\pi(4b^2 f^2 - 1)} \sin 2\pi b f \quad (2.2-24)$$

3) ハミング (Hamming) ウィンドウ

$$W(f) = 0.54 \times \frac{\sin 2\pi b f}{\pi f} - 0.23 \times \frac{8b^2 f}{\pi(4b^2 f^2 - 1)} \sin 2\pi b f \quad (2.2-25)$$

本研究では、これらのスペクトル・ウィンドウのうち、最も簡単によく用いられるハニングウィンドウを使用する。

2.3 トラップ封水変動のモデル化に関する基礎事項

本節では、トラップの封水変動のモデル化に関する基礎理論について述べる。

2.3.1 封水振動とばね振動

本節では、誘導サイホン作用におけるトラップ封水の挙動モデル（運動方程式）の導出を行う。管内圧力変動が封水に作用すると、瞬時に封水は応答して変動する。この現象は、管内圧力を強制力とし、封水を応答体とする強制振動現象（1自由度系振動）とみなすことができる。建物の地震応答と同じ現象である。

その基本応答は自由振動で表される。管内圧力（負圧） P がトラップに作用したとき、封水位 y は下位に変動する（図 2.3-1）。このとき ($t=0$) の y を y_0 とし、時間 t における y を y_t とする。 y_0 において、管内圧力がゼロ（大気圧）の状態であれば、封水は元に戻るように y_t は上位に変動し、再び、下位、上位に振動しながら変動し、その変動を繰り返すが、その変動幅（振幅）は徐々に小さくなり、やがて静止する ($y_t=0$)。

この自由振動は、図 2.3-2 に示すような、質量 m の物体がばね定数 k のばねに吊るされ、距離 y_0 ($t=0$) の状態から、自由振動する現象と同様である。

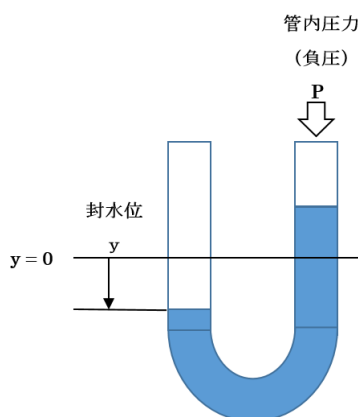


図 2.3-1 封水振動モデル

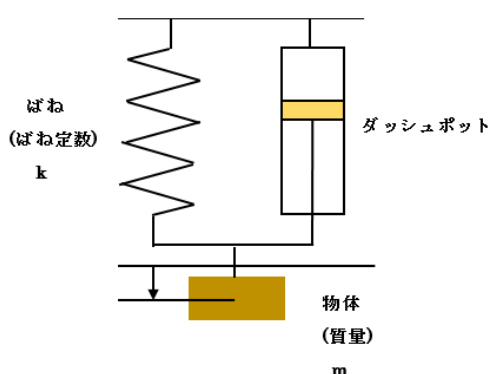


図 5.2-2 減衰振動モデル

2.3.2 ばね振動における自由振動の運動方程式

(1) 運動方程式

振動現象は、強制力のない場合の自由振動と強制力のある強制振動に大別される。一般の振動現象は強制振動である。自由振動は、固有周期・振動数、減衰係数・比などの振動特性の固有値を見出す際に扱われる。

ばね振動における自由振動現象の運動方程式にはニュートンの第2法則（運動量保存の法則）を当てはめられる。この現象に関係する力は、慣性力、減衰力（抵抗力）および復元力である。質量を m 、ばね定数を k 、ダッシュポット（減衰装置）による減衰係数を c とすると、慣性力は ma ($m \frac{dy^2}{dt^2}$) で表される。また、抵抗力は、速度に比例するものとして、 $c \frac{dy}{dt}$ で表される。復元力は、ばね定数 k と変位 y の積の ky で表される。したがって、運動方程式(式(2.3-1))が成立する。

$$m \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (2.3-1)$$

減衰振動は、一般に、 c が大きい「強い減衰（過減衰）($c^2 > 4mk$)」。 c が普通の「弱い減衰 ($c^2 < 4mk$)」、 c が極めて小さい「臨界減衰 ($c^2 = 4mk$)」に分けられる。封水振動は「弱い減衰」に相当する。この減衰振動における式(2.3-1)の一般解は式(2.3-2)となる。なお、この運動方程式は初期値問題であり、初期条件を設定すれば解が得られる。

$$y = e^{-\alpha t} (A \cos \omega^* t + B \sin \omega^* t) = G e^{-\alpha t} \cos(\omega^* t - \delta) \quad (2.3-2)$$

$$\text{ここに、 } G = A^2 + B^2$$

$$\alpha = \frac{c}{2m}$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k-c}{m}}$$

δ : 位相

$$\tan \delta = \frac{B}{A}$$

(2) 減衰比

減衰係数について、 $\sqrt{c^2 - m^2} = 0$ となる c を臨界減衰係数 c_c といい、式(2.3-3)で表される。

$$c_c = 2\sqrt{mk} \quad (2.3-3)$$

式(2.3-4)で表される ζ を減衰比といい、減衰係数 c は式(2.3-5)で求められる。

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.3-4)$$

$$c = \zeta c_c \quad (2.3-5)$$

先述した「強い減衰」、「弱い減衰」、「臨界減衰」は、減衰比： ζ によっても区分できる。すなわち、「強い減衰（過減衰）」は $1 < \zeta$ 、「弱い減衰」は $0 < \zeta < 1$ 、「臨界減衰」は $\zeta = 0$ である。

(2.3-2)を用いて、例えば、 $G=1$ 、 $\alpha=0.1$ 、 $\omega^*=2$ 、 $\delta=0$ とし、初期条件 $t=0$ とした場合、ばね振動の自由振動波形は図 5.2-3 のようになる。

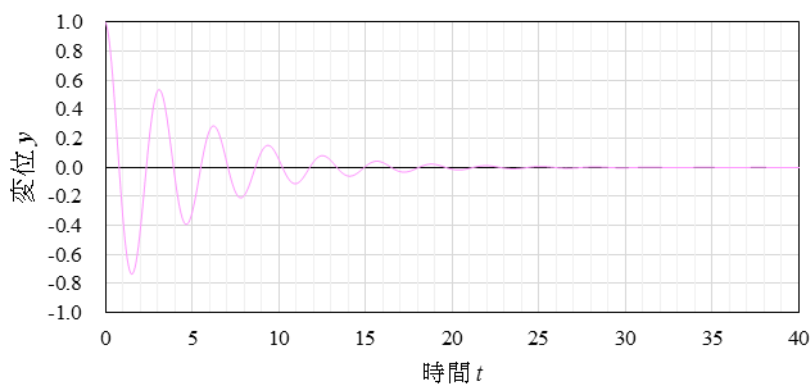


図 2.3-3 1 自由度系減衰振動の自由振動波形

(3) 固有周期と固有振動数

固有角振動数 ω_0 は式(2.3-6)で表される。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3-6)$$

固有各振動数 ω_0 と固有周期 : T_0 および固有振動数 : f_0 の関係は式(2.3-7)であるので、固有周期は式(2.3-8)、固有振動数は式(2.3-9)で表される。

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.3-7)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{(k/m)}} \quad (2.3-8)$$

$$f_0 = \frac{\sqrt{(k/m)}}{2\pi} \quad (2.3-9)$$

2.4 本論文に関する用語

本節では本論文で使用されている用語のうち、特徴的であり、かつ解釈を明確にしておく必要があるとみられたものについて解説した。

トラップ性能試験法関連

(1) **耐圧力性能(封水強度)** 排水管内に正圧、もしくは負圧が生じた際のトラップの封水保持能力を示す。

(2) **封水損失** 誘導サイホン作用や、器具の自己排水による自己サイホン作用、蒸発、もしくは毛細管現象といったことが原因でトラップの封水が減少すること。

(3) **ローパスフィルター (LPF) 処理** : 波において、ある一定の周波数以上の周波数帯域を取り除き、その周波数以下の周波数成分のみ抽出する処理。本論文では LPF 処理と称している。

(4) **カットオフ振動数** : ローパスフィルター処理を行う際の取り除く周波数帯域の規準の振動数を示す。例えば、カットオフ振動数が 3Hz のローパスフィルター処理とは、その波形における 3Hz 以上の成分を取り除き、残りの 3Hz 以下の成分を抽出するということの意味する。

(5) **卓越振動数** : 圧力波や音といった波の現象は、様々な周波数成分から成り立っている。その中でも、含まれている量が多い周波数成分を指す。含まれている量が多い順に第 1 位卓越振動数、第 2 位卓越振動数、第 3 位卓越振動数、……ということもある。

(6) **固有振動数** : 物体を自由に振動させたときに検出される振動数。

(7) **共振現象**：静止している物体が、その物体の固有振動数に近い周波数の振動を受けると、静止していた物体そのものも、固有振動数で振動を始める現象。

タワー実験関連

(8) **実大排水実験タワー**：実際の建物において排水が行われた際の排水管内の状況を再現することができる実験施設。ここで管内圧力変動のデータや封水変動のデータを採取する。

(9) **SDF システム**：排水立て管と横枝管の継手に特殊排水継手（後述）を用いた排水システム。SDF は Special Drainage Fitting の略。

(10) **JISF システム**：排水立て管と横枝管の継手に JIS 継手（後述）を用いた排水システム。JISF は、Japan Industry Standard Fitting の略。

(11) **階数規模**：実大排水実験タワーで排水実験を行う際の階数規模を指す。排水の負荷は最上階から行う。

(12) **サンプリング周波数**：波の変動などの波形をコンピューターを用いて記録するためには、デジタル変換を行わなければならない。その際の 1 秒間に採取するデータの数を指す。例えば 0.02 秒ごとにデータを取る場合、1 秒間に 50 個のデータを取得することになるので、サンプリ

(13) **MEPRO**：本研究で使用している、解析ソフト。圧力変動や水位変動の圧力波形を表示させることや、スペクトル解析、ローパスフィルター処理などを行うことができる。

(16) **特殊継手**：伸張通気方式の排水立て管において、管内圧力を緩和させる目的で流動状態を変化させ、コントロールする機能をもつ、特殊形状の継手の総称。特殊排水継手。

第 3 章

トラップの有無が管内圧力に及ぼす影響

3.1 解析目的^{27),28),29)30)}

空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 218-2008「集合住宅の排水立て管システムの排水能力試験法」では、特殊継手排水システム（特殊排水継手を用いた単一立て管方式）の排水能力（許容排水流量）を決定する試験方法が規定されているが、その試験判定条件として、許容封水損失 25mm と許容管内圧力±400Pa の二条件が併用されている。しかし、封水損失の測定においては、負荷試験ごとに封水の補給が必要となり、瞬時破封の確認など作業が煩雑となる。そのため、実際の試験では、トラップを接続せず、排水横枝管の末端に PVC キャップで蓋をした状態で測定を行い、管内圧力のみによって試験判定がなされている。

一方、既往の研究により、トラップが接続されると、PVC キャップ接続状態に比べ、管内圧力が約 10% 低減することが確認されている。また、接続したトラップの固有振動数の近辺で管内圧力変動のパワースペクトル密度分布の傾向に大きな変化がみられた。これより、トラップの封水変動は、管内圧力変動に対する応答現象であり、相互に影響を及ぼし合うものと推察した。

本章では、既往の研究で確認されたトラップ封水が管内圧力とパワースペクトル密度分布に影響を及ぼす要因を明らかにするため、形状の異なるトラップを対象に実大排水タワー実験を行い、管内圧力解析を行った。

3.2 実大排水タワー実験の概要

3.2.1 実験目的

SHASE-S 218₂₀₀₈に基づく定流量排水負荷を与えた際、各階の排水横枝管におけるトラップを接続した場合とトラップを接続していない場合の圧力変動と、接続した各種供試トラップの封水変動および残留封水深のデータを得ることを目的として実験を行った。

3.2.2 実験排水システム

実験排水システムの概要を図 3.2-1 に、実大排水タワーの写真を写真 3.2-1 に示す。本システムは伸頂通気方式で、15 階規模の中高層規模を想定した特殊継手排水システムとする。特殊継手を写真 3.2-2、パラメータを図 3.2-2 に示す。実験排水システムにおいて、2～12 階の排水横枝管の末端に、トラップ無しの場合には PVC キャップ、トラップ有りの場合には各種供試トラップを接続した。トラップ無しとトラップ有りの場合の排水横枝管末端の様子を写真 3.2-3 に示す。トラップ有りの場合、設置階は図 3.2-1 に示すように 2～12 階に全階設置する場合と 2、7、11 階にのみ設置する場合の 2 パターンで測定し、トラップ封水の初期水位はすべて満水状態で設置した。圧力センサは 2～12 階の各階、水位センサは 2、7、11 階に設置した。

3.2.3 供試トラップ

供試トラップの断面形状を図 3.2-3 に、パラメータを表 3.2-1 に示す。供試トラップは、口径 75A と 30A の P トラップ、S トラップ、わんトラップ、逆わんトラップ、わんトラップを 4 つ接続したもの（写真 3.2-4 参照、以下、4 わんという）、大便器とした。口径 75A と 30A の P トラップは、75A と 30A の 90°ショートエルボを用いてそれぞれ作成した。75A の P トラップと 4 わんトラップは、大便器の封水量を参考に、封水量の多い管トラップと隔壁トラップという設定で作成した。供試トラップの設置条件を表 3.2-2、設置状態の様子を写真 3.2-5 に示す。

3.2.4 実験方法

(1) 負荷流量

SHASE-S 218₂₀₀₈に基づく定流量排水負荷を行った。負荷流量は、4.0L/s と 6.0L/s とした。

(2) 測定条件

実験・計測機器を写真 3.2-6、実験日時と天候を表 3.2-3 に示す。排水横枝管（排水立て管の管芯から 500mm の位置の頂部）の圧力変動と、供試トラップの封水変動および残留封水深を測定した。サンプリング周期は 20msec（50Hz）とし、排水流量が定常状態に達してから 1 分間、ローパスフィルタは無しの状態で測定を行った。測定は、大便器全階設置の場合において 5 回、それ以外の各条件においてが 3 回ずつおこなった。

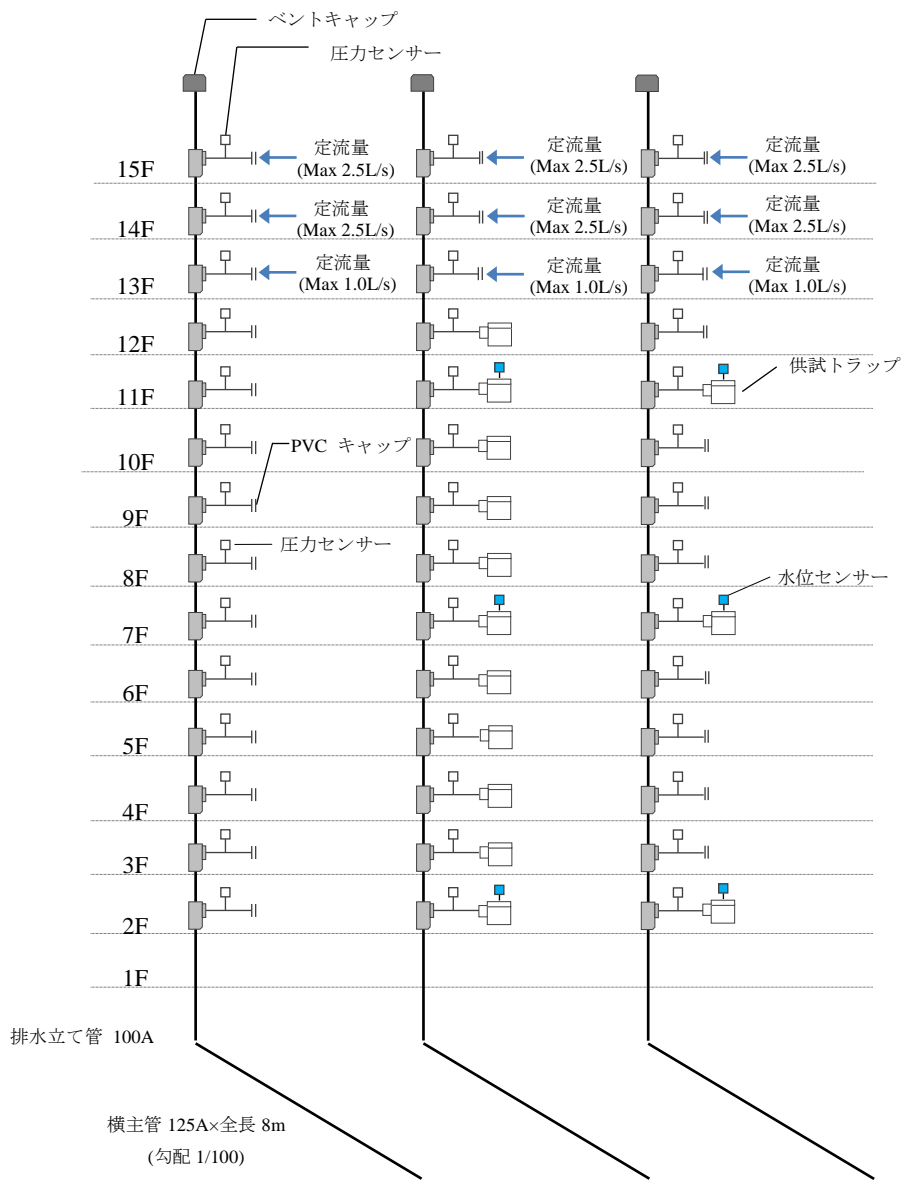


図 3.2-1 実験排水システムの概要



写真 3.2-1 実大排水タワー



写真 3.2-2 特殊継手

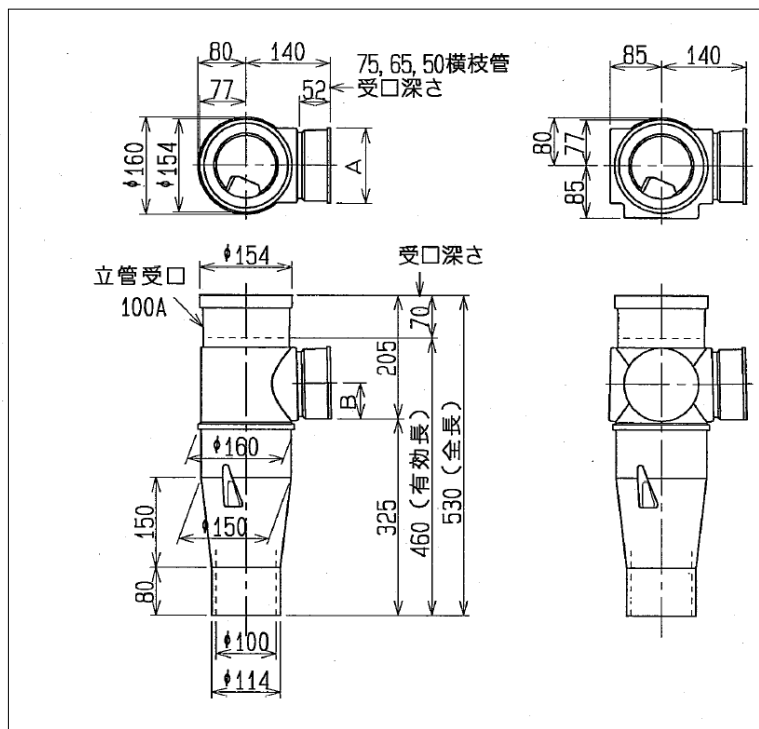
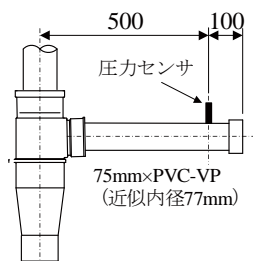
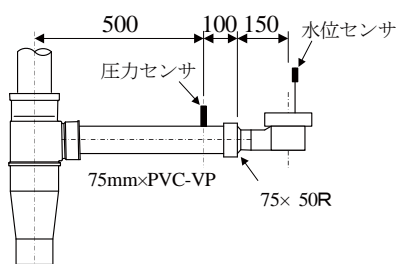


図 3.2-2 特殊継手のパラメータ



トラップなし



トラップあり

写真 3.2-3 排水横枝管末端の様子

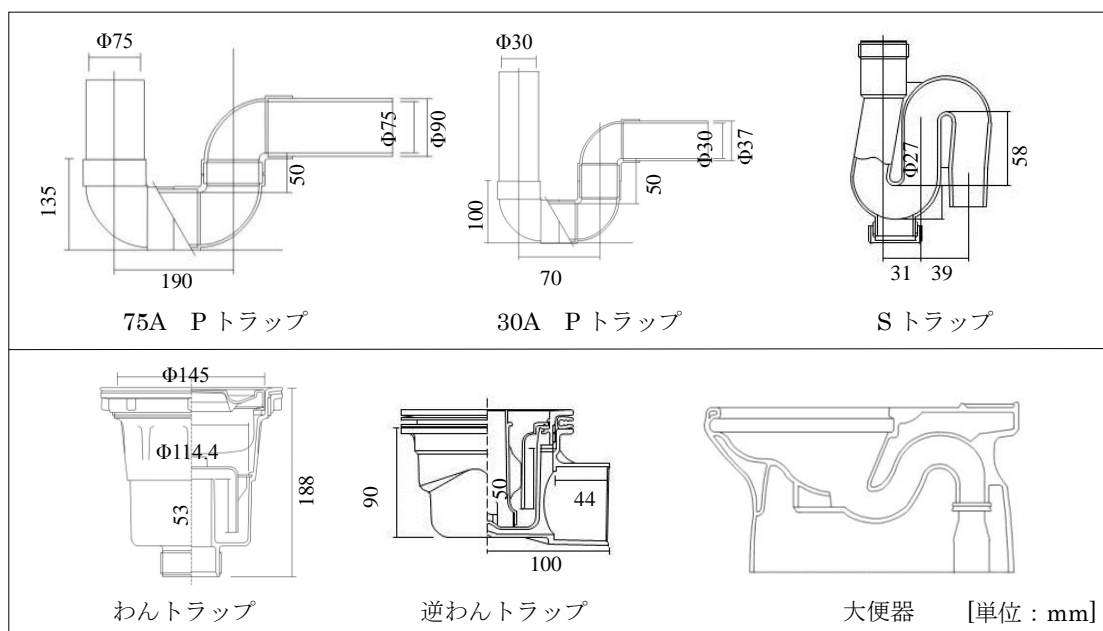


図 3.2-3 供試トラップの断面形状

表 3.2-1 供試トラップの基本パラメータ

供試トラップ	脚断面積比[-]	口径[mm]	封水深[mm]	封水量[mL]
75A Pトラップ	1	75	50	2,000
30A Pトラップ	1	30	50	150
Sトラップ	1	30	58	66
わんトラップ	1.37	-	53	430
4わんトラップ	1.37	-	53	1,720
逆わんトラップ	1.07	-	50	330
大便器	0.16	-	58	1,600



写真 3.2-4 4わんトラップ

表 3.2-2 トラップの設置条件

トラップ設置階	供試トラップ
全階設置 (2~12 階)	75A、30A、S、わん、逆わん、大便器
3ヶ階設置 (2、7、11 階)	S、わん、4わん、大便器



75A Pトラップ



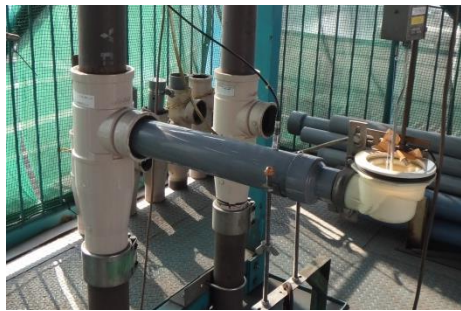
30A Pトラップ



Sトラップ



わんトラップ



逆わんトラップ



大便器

写真 3.2-5 トラップの設置状況



圧力変動アンプ



トラップ封水補給スイッチ



封水変動アンプ



大便器同時洗浄制御装置

写真 3.2-6 実験・測定機器

表 3.2-3 実験日時と天候条件

実験条件	全階設置	全階設置	3ヶ階設置	トラップ無し
供試トラップ	大便器	Sトラップ、逆わん、わん Pトラップ(30A、75A)	Sトラップ、わん 4わん、大便器	無し
実験日時	2015年 9月14日	2013年 11月6日～7日	2013年 11月6日～7日	2013年 11月6日～7日 2015年 9月14日
天候	曇り	曇り	曇り	曇り

3.3 管内圧力変動の比較

3.3.1 解析目的

SHASE-S218₂₀₀₈ 試験法による排水立て管の排水性能試験では、簡便性からシステムにトラップを設置せずに実験をする場合が多く、この条件で測定された結果は過度に安全性となっている可能性がある。既往の研究により、トラップを接続した場合、トラップがない状態と比較して管内圧力が低減していることが確認された。そこで、トラップ封水が管内圧力を低減させている要因を調べるため、5種類の形状が異なる供試トラップを用いて、トラップ接続した場合の管内圧力（以下、 P_I とする）とトラップなしの管内圧力（以下、 P_0 とする）の比較・検証を行った。

3.3.2 解析方法

管内圧力の変動幅を定量的に比較するために、各階における管内圧力の標準偏差を算出した。

3.3.3 解析結果

各トラップにおける各階の管内圧力変動の標準偏差を図 3.3-1～3.3-4 に示す。トラップを接続した場合、標準偏差は小さくなる傾向となった。これは、口径 75A の P トラップ、わんトラップ、逆わんトラップ、大便器といった封水量の多いトラップで顕著に表れた。しかし、30A の P トラップ、S トラップといった封水量の少ないトラップでは、明確な標準偏差の低減はみられなかった。これより、管内圧力の低減に影響を及ぼす要因として封水量が考えられる。

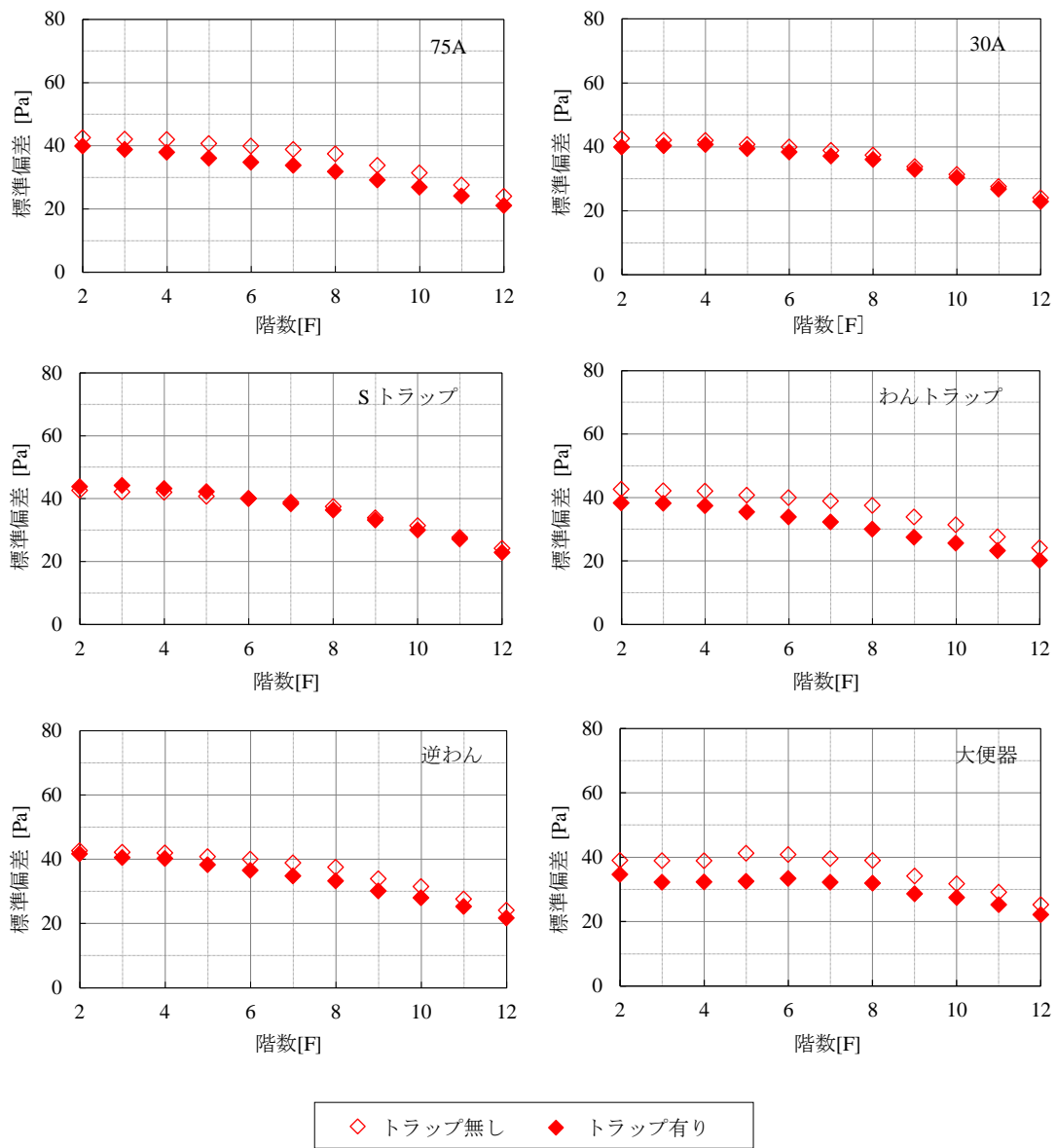


図 3.3-1 各トラップにおける管内圧力変動の標準偏差 (全階設置_4.0L/s)

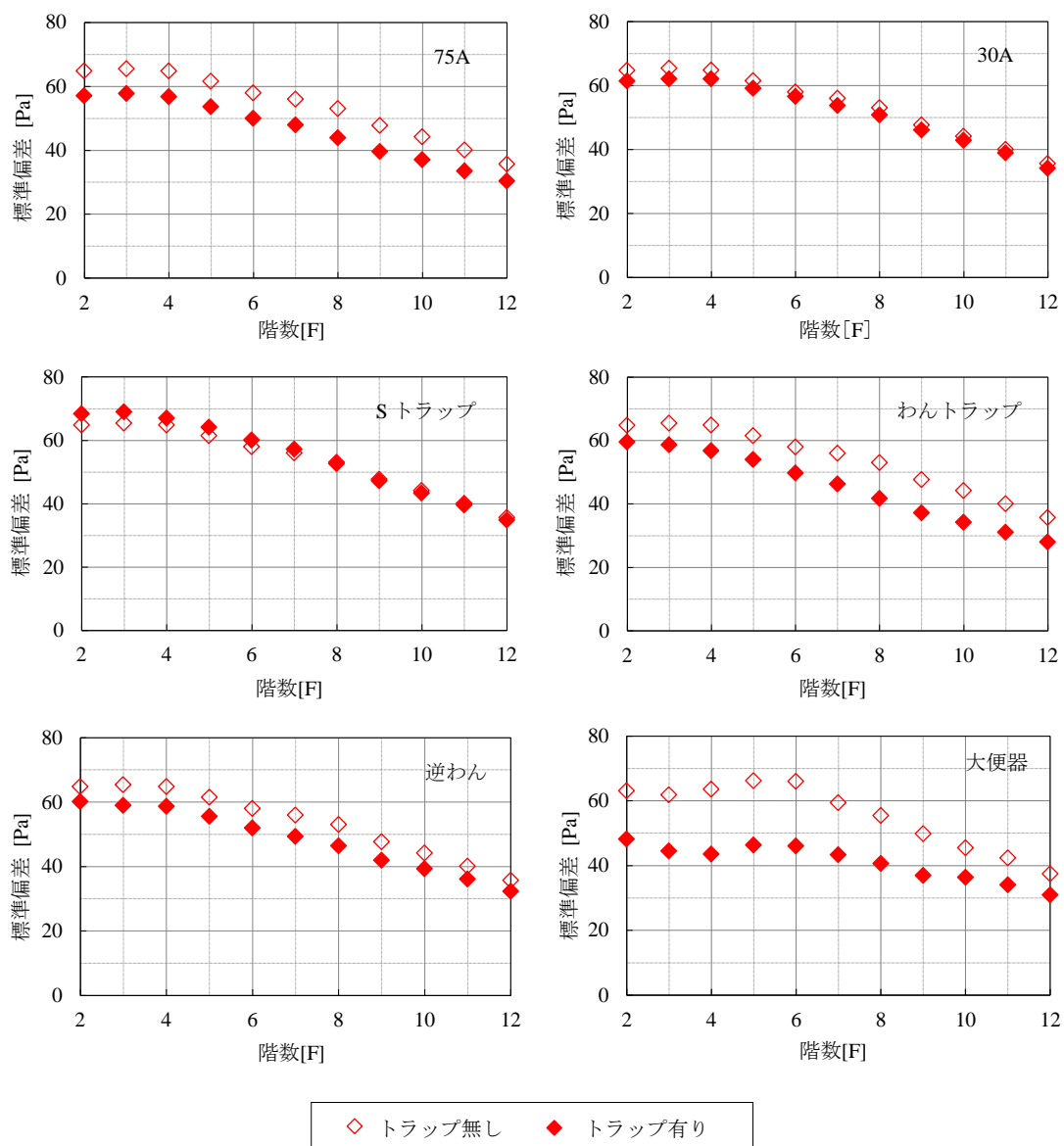


図 3.3-2 各トラップにおける管内圧力変動の標準偏差 (全階設置_6.0L/s)

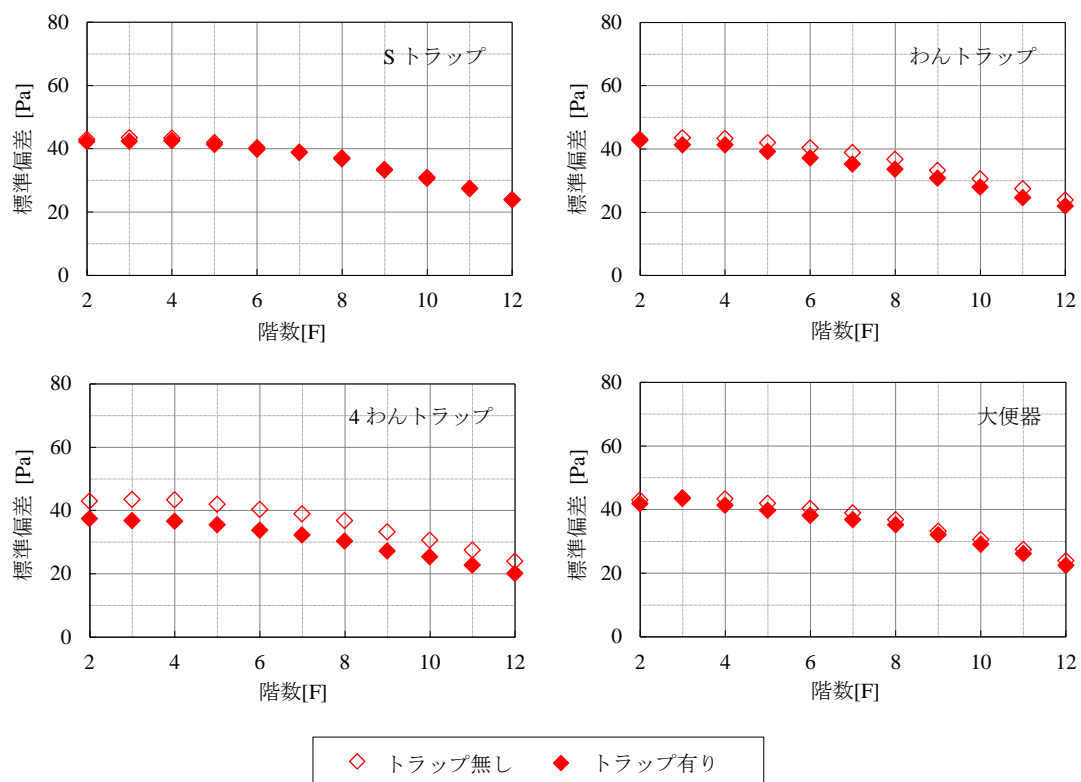


図 3.3-3 各トラップにおける管内圧力変動の標準偏差 (3ヶ階設置_4.0L/s)

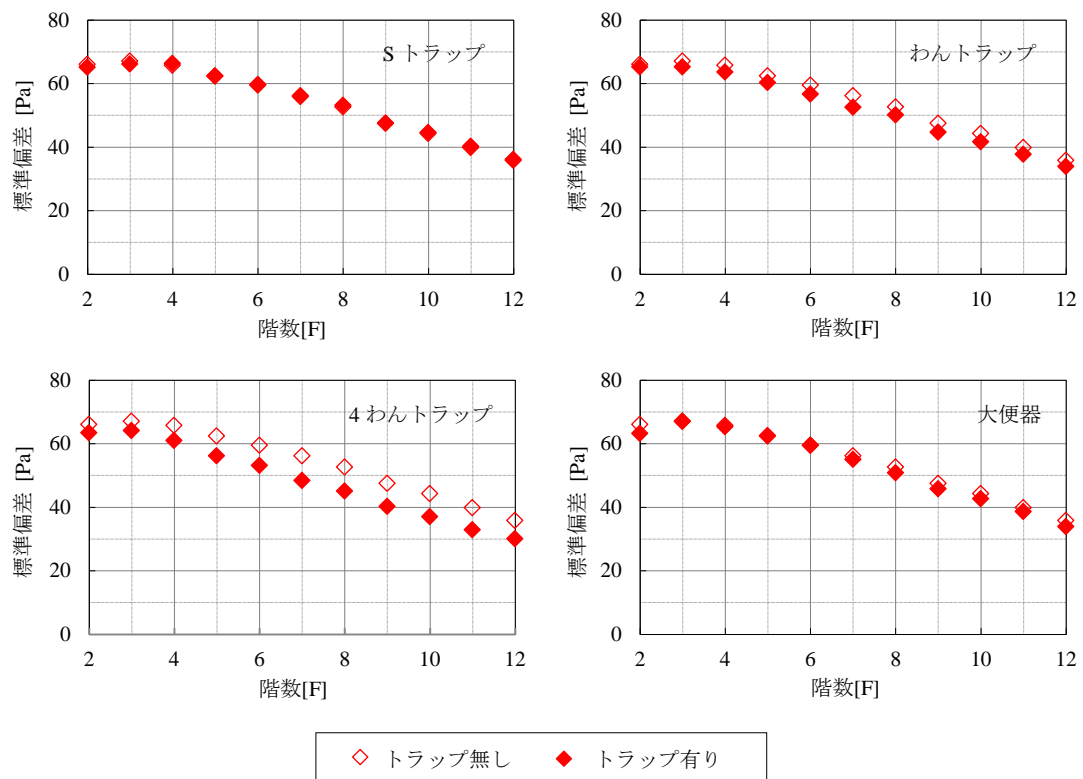


図 3.3-4 各トラップにおける管内圧力変動の標準偏差 (3ヶ階設置_6.0L/s)

3.4 システム最大・最小圧力値の低減率

3.4.1 解析目的

SHASE-S 218 の試験判定条件では、許容管内圧力が $\pm 400\text{Pa}$ 以内とされている。これは、システム最大・最小圧力値 $P_{s\max}$ 、 $P_{s\min}$ が $\pm 400\text{Pa}$ を超過しないということを意味している。そこで、各供試トラップを接続することで、試験判定に用いられる圧力値である $P_{s\max}$ と $P_{s\min}$ の変化を調べた。

3.4.2 解析方法

3Hz ローパスフィルターを施した管内圧力変動のデータを用いて、トラップ無しとトラップ有りの管内圧力 (P_0 、 P_1) のプロフィール (最大圧力値： $P_{0\max}$ と $P_{1\max}$ 、平均圧力値： $P_{0\text{ave}}$ と $P_{1\text{ave}}$ 、最小圧力値： $P_{0\min}$ と $P_{1\min}$ とする) を各階ごとに重ね合わせたグラフを作成および、 $P_{s\max}$ と $P_{s\min}$ を算出し、比較・検証を行った。以下、トラップ無しのシステム最大圧力値を $P_{0s\max}$ 、システム最小圧力値を $P_{0s\min}$ 、トラップ有りのシステム最大圧力値を $P_{1s\max}$ 、システム最小圧力値を $P_{1s\min}$ と表記する。

また、トラップ接続による $P_{s\max}$ 、 $P_{s\min}$ の変化率 (以下、低減率という) をそれぞれ算出し、 $P_{s\max}$ 、 $P_{s\min}$ に及ぼす影響を定量的に評価した。この際、最大圧力値の低減率は、 $P_{1s\max}$ を $P_{0s\max}$ で除したもの、最小圧力値の低減率は、 $P_{1s\min}$ を $P_{0s\min}$ で除したものとする (式 3.3-1)。

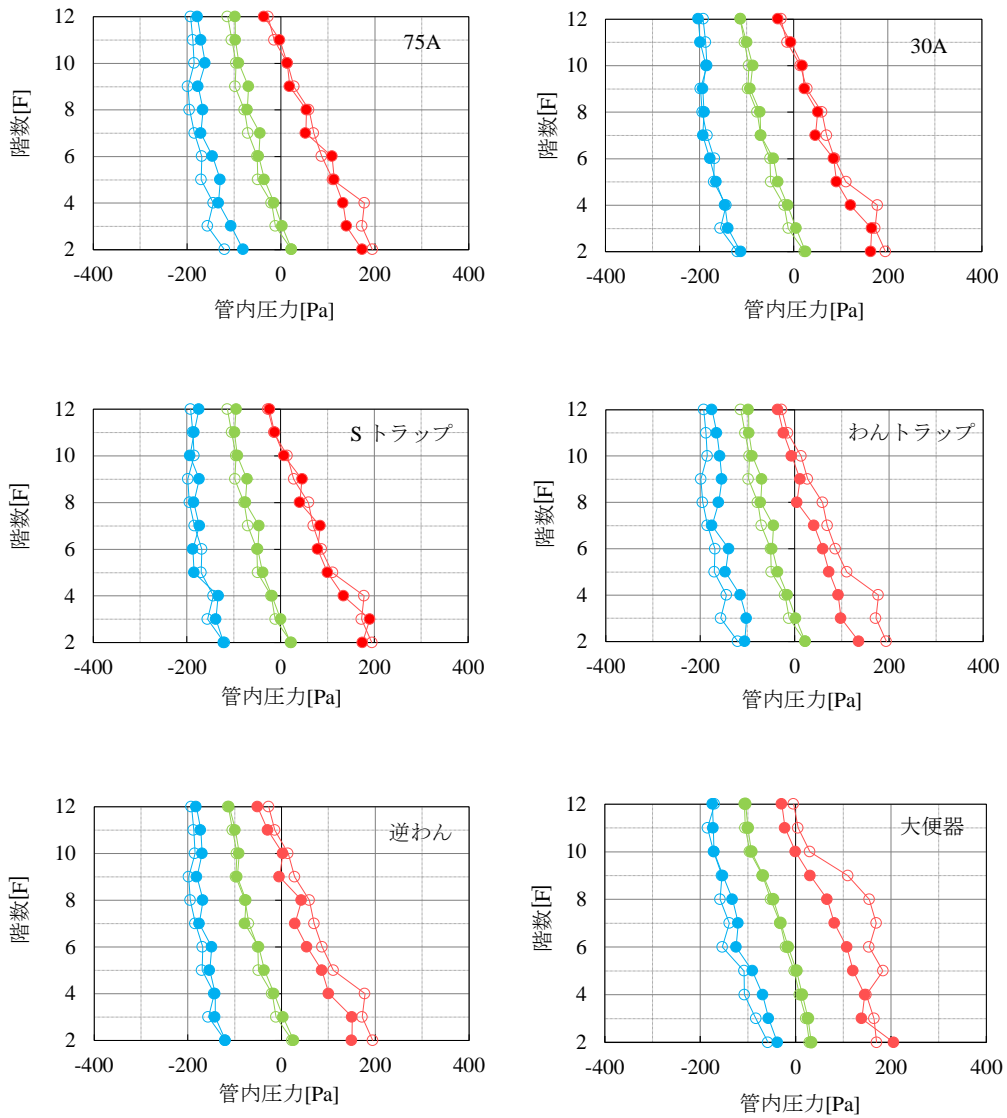
$$\text{低減率} = \frac{P_{1x}}{P_{0x}} \quad (3.3-1)$$

3.4.3 解析結果

各トラップにおける各階管内圧力プロファイルを図 3.4-1～3.4-4 に示す。既往の研究で確認されたように、すべての供試トラップにおいて、 P_1 の方が P_0 に比べ、 P_{max} と P_{min} の絶対値が小さくなった。また、管トラップと隔壁トラップを比較すると、隔壁トラップの方が P_1 の絶対値の減少傾向が顕著にみられた。このことから、隔壁トラップは、管トラップと比較して管内圧力を低減させる作用が大きいと考えられる。

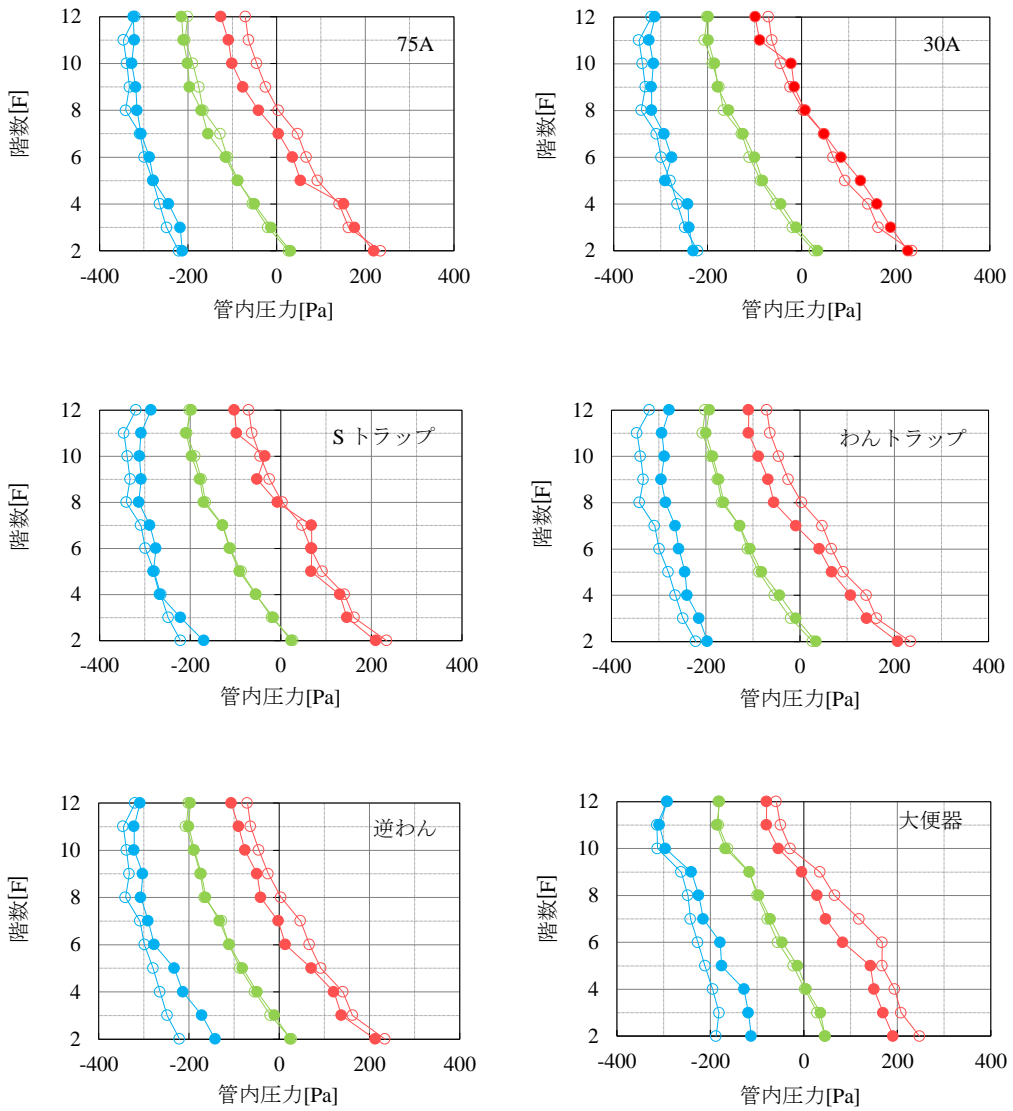
各トラップ接続時のシステム最大・最小圧力値 $P_{s max}$ 、 $P_{s min}$ と低減率を図 3.4-5～3.4-8 に示す。

トラップを接続した場合、全てのトラップにおいて、低減率は 1 より小さい値となった。負荷流量 4.0L/s の場合、 $P_{s max}$ は S トラップ以外の場合において、トラップ接続することで大きく低減し、 $P_{s min}$ は S トラップと 30A の P トラップ以外の場合において大きく低減する傾向であった。負荷流量 6.0L/s の場合は、 $P_{s max}$ および $P_{s min}$ とともに、低減率は約 0.85～0.95 に推移しており、トラップの接続によってシステム最大・最小圧力値は約 10% 低減すると考えられる。また、管トラップと比較して隔壁トラップを接続した場合の方が $P_{s max}$ は低減した。これより、隔壁トラップは管トラップに比べ、システム最大圧力値を低減させる作用が大きいと考えられる。



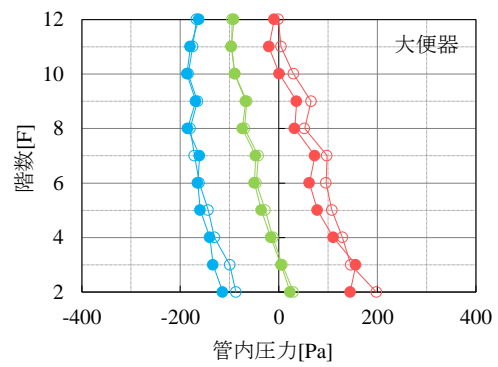
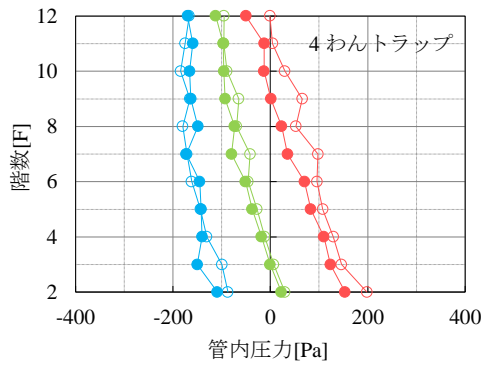
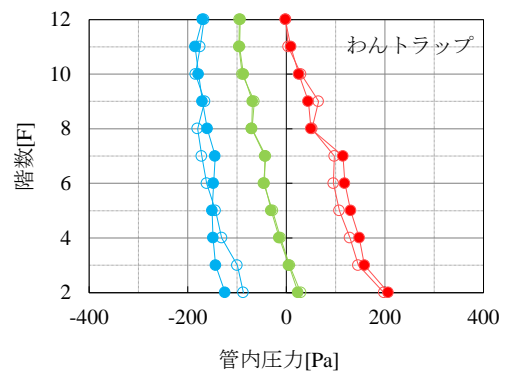
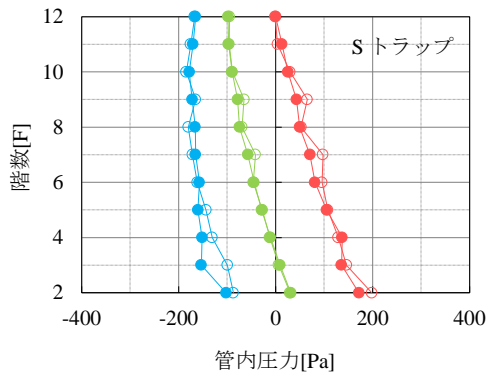
	P_{max}	P_{ave}	P_{min}
トラップ有り	—●—	—●—	—●—
トラップ無し	-○-	-○-	-○-

図 3.4-1 管内圧カプロフィール (全階設置_4.0L/s)



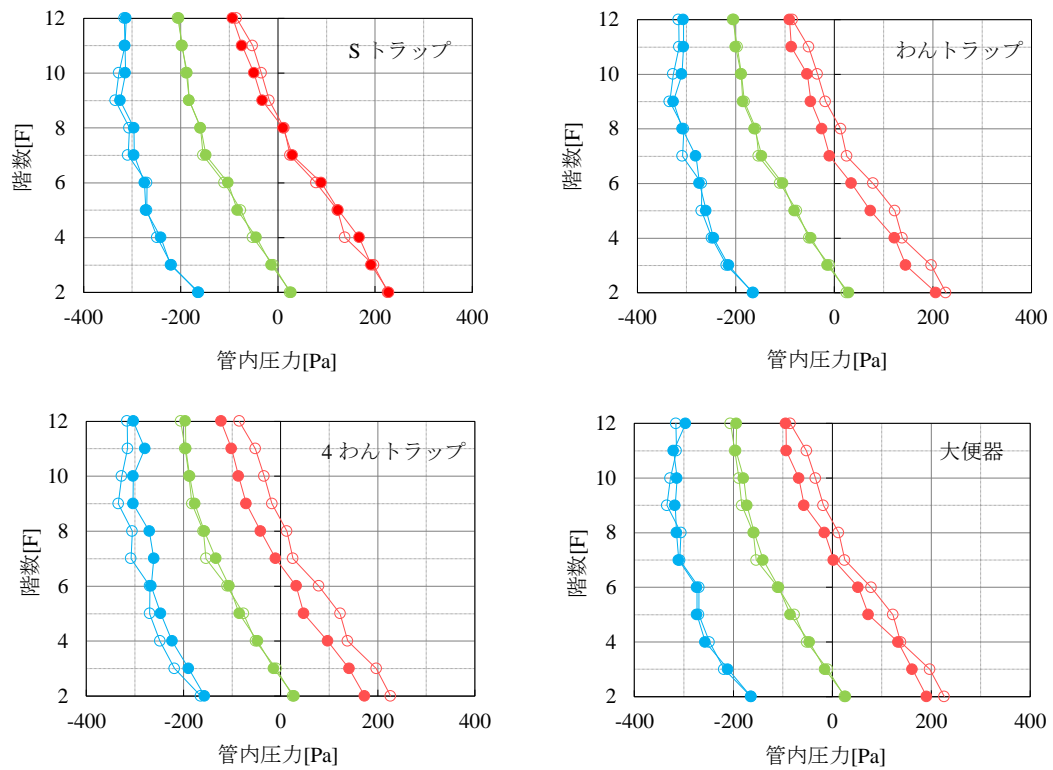
	P_{max}	P_{ave}	P_{min}
トラップ有り	●	●	●
トラップ無し	○	○	○

図 3.4-2 管内圧カプロフィール (全階設置_6.0L/s)



	P_{max}	P_{ave}	P_{min}
トラップ有り	—●—	—●—	—●—
トラップ無し	—○—	—○—	—○—

図 3.4-3 管内圧カプロフィール (3ヶ階設置_4.0L/s)



	P_{max}	P_{ave}	P_{min}
トラップ有り	●	●	●
トラップ無し	○	○	○

図 3.4-4 管内圧カプロフィール (3ヶ階設置_6.0L/s)

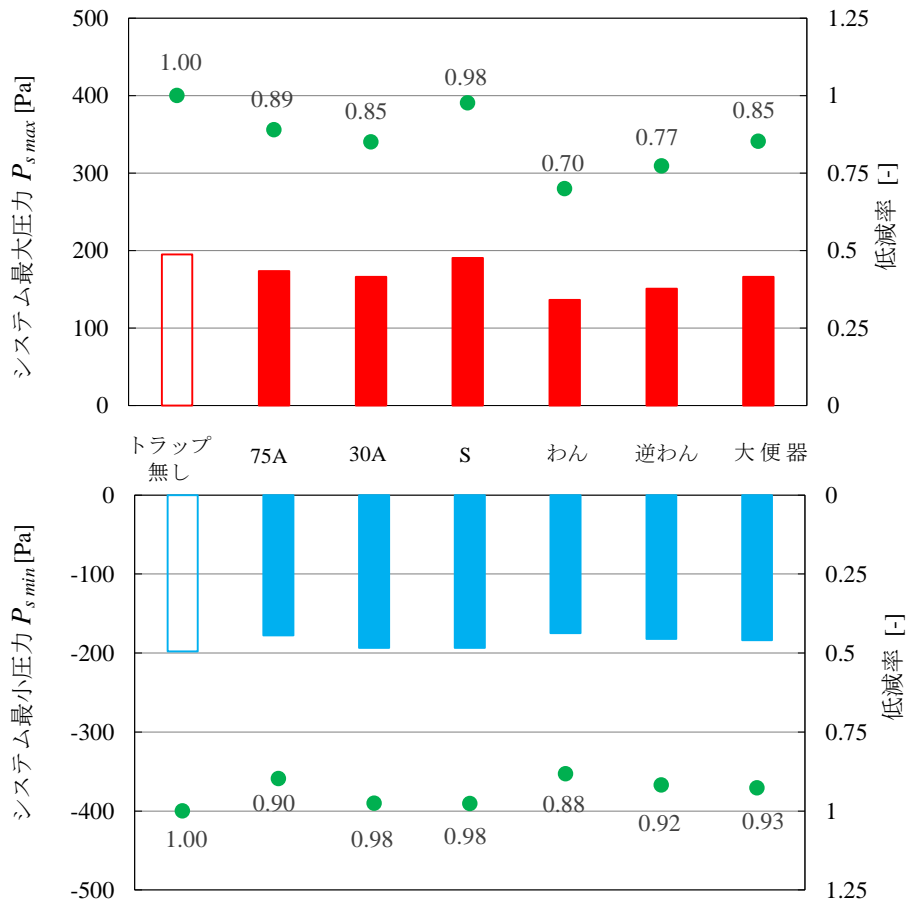


図 3.4-5 システム最大・最小圧力値と低減率（負荷流量 4.0L/s）

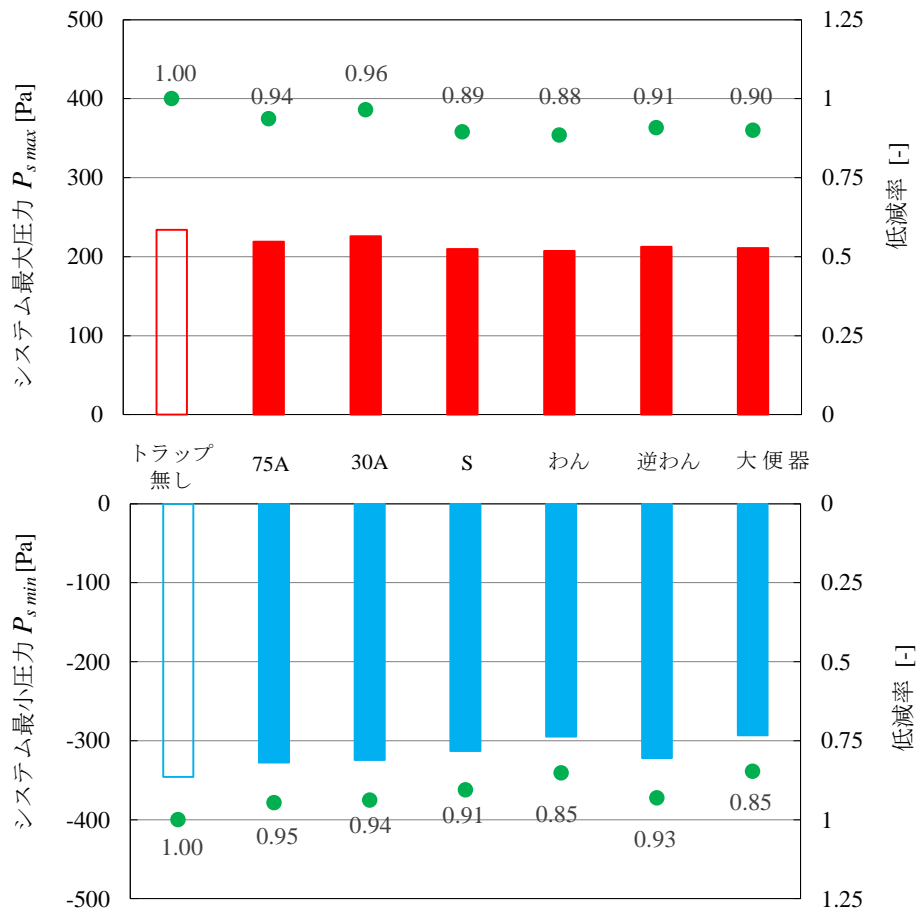


図 3.4-6 システム最大・最小圧力値と低減率（負荷流量 6.0L/s）

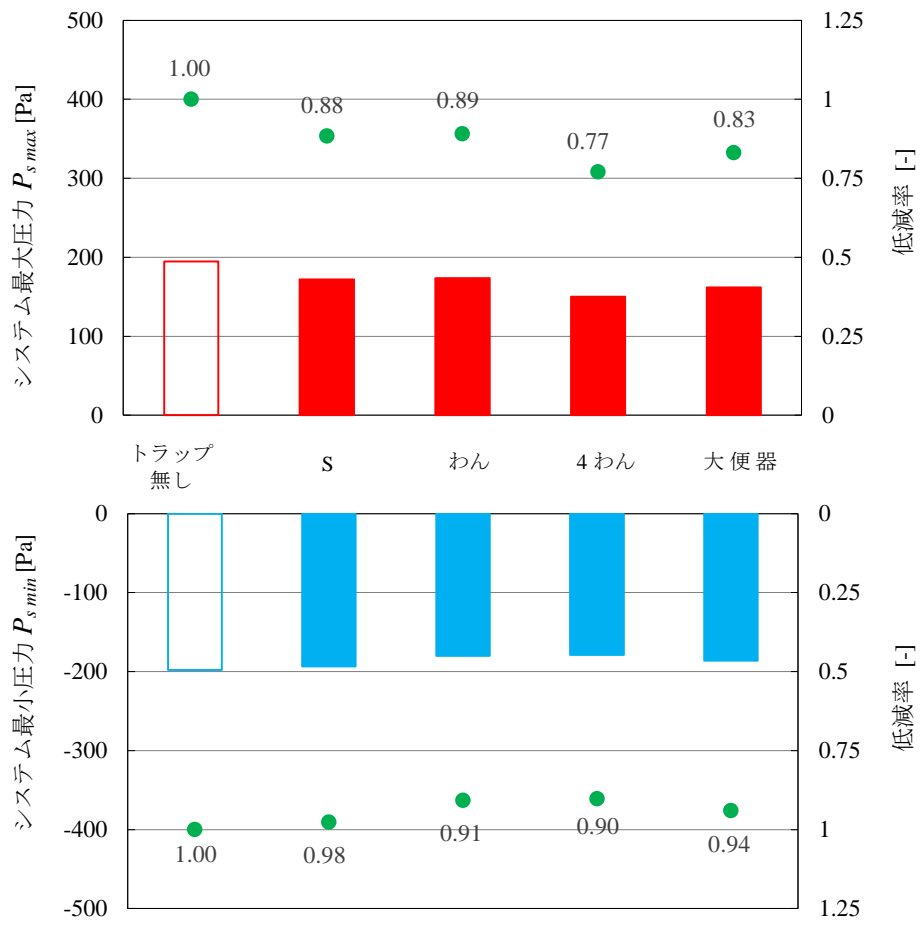


図 3.4-7 システム最大・最小圧力値と低減率（負荷流量 4.0L/s）

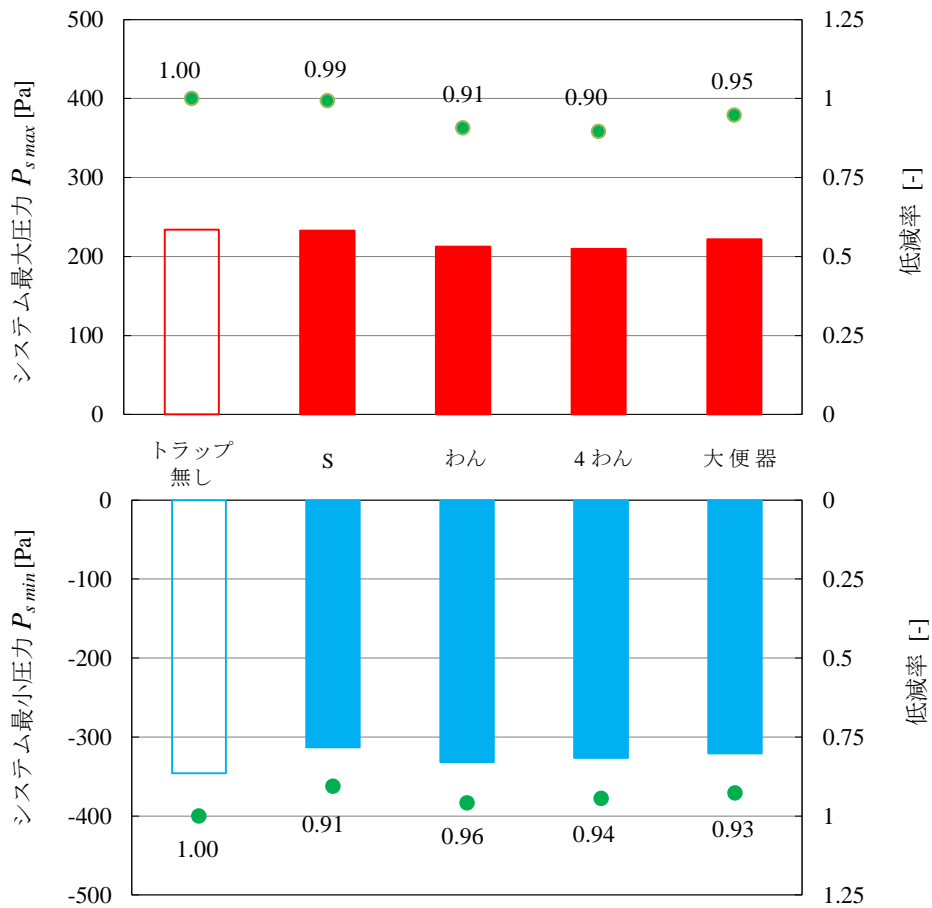


図 3.4-8 システム最大・最小圧力値と低減率（負荷流量 6.0L/s）

3.5 卓越振動数への影響

3.5.1 解析目的

既往の研究では、排水システムにおけるトラップの有無が管内圧力に及ぼす影響を定量的に評価した結果、トラップを接続した際の管内圧力変動の標準偏差およびシステム最小値は、トラップを接続せずにPVCキャップで蓋をした場合と比較して約10%低減することが確認された。トラップの封水変動が管内圧力変動への応答現象であることは明らかであるが、同時に、トラップ封水が振動することにより、管内圧力の変動成分や圧力最大・最小値を減少させていると推察される。つまり、トラップの封水変動と管内圧力変動は相互に影響を及ぼしていると考えられる。

一方で、トラップを接続した場合と接続していない場合の管内圧力変動とトラップの封水変動にパワースペクトル解析を行い、振動特性を調べたところ、それらのパワースペクトル密度分布は大きく異なっていることが既往の研究で確認されている。既往の研究による、パワースペクトル密度分布の比較を図3.5-1に示す。トラップを接続した場合の管内圧力変動のパワースペクトル密度分布の卓越振動数は2~3Hzに分布するが、トラップを接続していない場合のパワースペクトル密度分布は2~3Hzの範囲が0に近い値となっていた。

本項では、5種類のトラップを接続した場合における管内圧力変動のパワースペクトル解析を行い、卓越振動数の分布傾向を調べた。

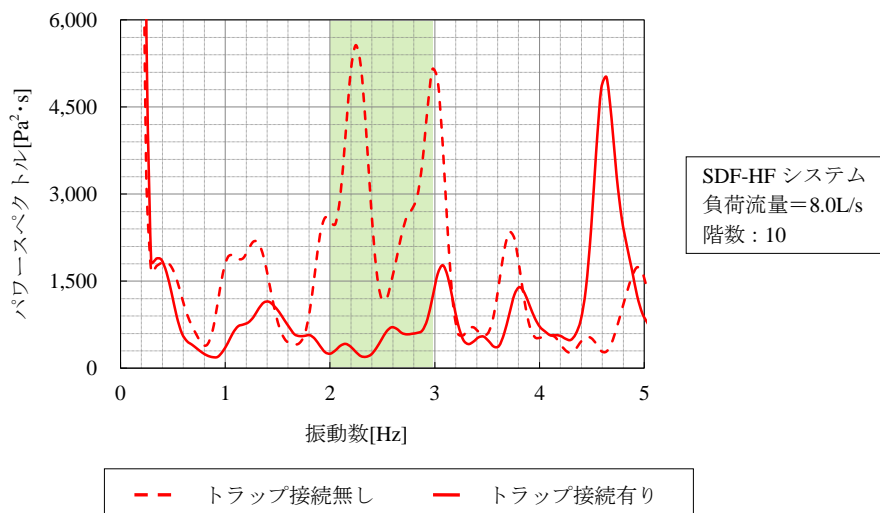


図 3.5-1 パワースペクトル密度分布の一例（既往の研究）

3.5.2 解析方法

トラップの封水変動、トラップを接続した場合の管内圧力変動および接続していない場合の管内圧力変動に FFT 処理によるパワースペクトル解析を行い、パワースペクトル密度分布を得た。スペクトルの処理条件を表 3.5-1 に示す。本実験のデータは、サンプリング周波数 50Hz（サンプリング周期 0.02sec）において 60 秒間（サンプリング個数 3000 点）で採取されている。データ処理長を 1024 点（20.48sec）としたことから、処理長の中心（10.24sec の点）を採取されたデータ全体の中心（30sec の点）となるように解析範囲（図 3.5-2）を設定した。

トラップの封水変動のパワースペクトル密度分布より、卓越振動数が満水を初期条件とするトラップのおおよその固有振動数とみなし、トラップを接続した場合の管内圧力変動と接続していない場合における各トラップの固有振動数周辺の管内圧力変動のパワースペクトル密度分布を比較・検討した。

解析の対象階は、階層の違いによるスペクトルの変化を読み取るためには、低層階、中層階、高層階の 3 層に分けて解析を行えば十分であるとし、また、トラップを 3 ヶ階設置した場合との比較も考慮して、低層階を 2 階、中層階を 7 階、高層階を 11 階として解析を行った。

表 3.5-1 スペクトルの処理条件

アルゴリズム	Sande-Tukey
窓関数	Hanning Window
データ処理長	1024
平滑化バンド幅	0.15Hz

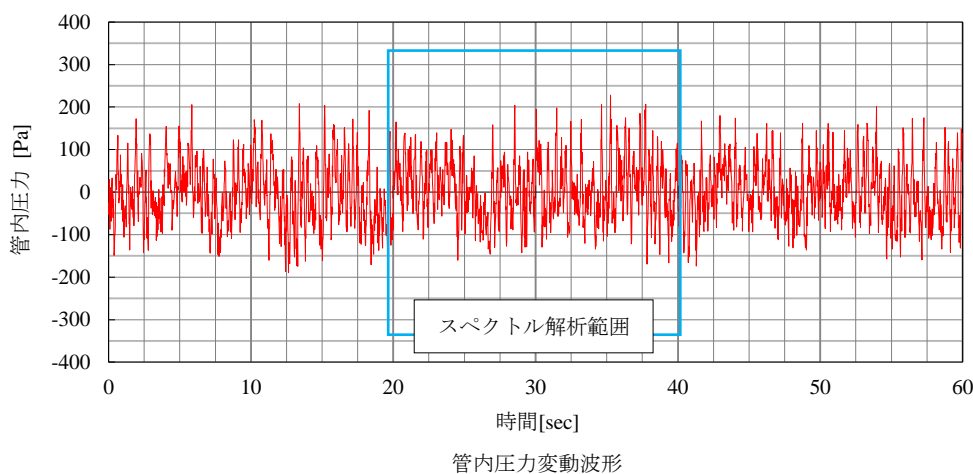


図 3.5-2 パワースペクトル解析の範囲

3.5.3 解析結果

トラップの封水変動波形とそのパワースペクトル密度分布の一例を図 3.5-3 に示す。パワースペクトル密度分布図に表れた最も卓越している振動数をそのトラップの固有振動数とする。(例：30A の P トラップの固有振動数は 1.66Hz) このように求めた各トラップの固有振動数を表 3.5-2 に示す。

負荷流量 6.0L/s の際、トラップの有無を比較した管内圧力変動と封水変動のパワースペクトル密度分布を図 3.5-4～図 3.5-13 に示す。

パワースペクトル密度分布の傾向はトラップによって大きく異なる結果となった。トラップを接続していない場合(赤線)の卓越振動数は、2~3Hz に分布しているのに対して、わんトラップ、逆わんトラップといった隔壁トラップを接続した場合(青線)は、2~3Hz の範囲が 0 に近い値となる傾向がみられた。一方、75A と 30A の P トラップでは、この傾向がみられなかった。この理由として、本実験で使用したトラップが異なる固有振動数を有していることが考えられる。隔壁トラップであるわんトラップ、逆わんトラップの固有振動数が、2~3Hz に分布している一方で、75A と 30A の P トラップの固有振動数は 1~2Hz であった。トラップを接続していない場合(自然状態)の管内圧力変動では 2~3Hz の振動成分が多いため、振動域が一致する隔壁トラップを接続した場合に応答現象が大きく現れたと考えられる。

しかし、S トラップの固有振動数は 2~3Hz に分布するが、わんトラップ、逆わんトラップと同様の傾向がみられなかった。これは、S トラップの封水量が他のトラップと比較して非常に少なかったことが原因であると考えられる。

大便器は封水量が大きく、封水変動の卓越振動数が 1.27Hz と 2.47Hz であり固有振動数が 2~3Hz に分布しているが、管内圧力変動の卓越振動数は 0 に近い値とならなかった。このことから、トラップの封水量および固有振動数のみでなく、トラップ自体の形状も管内圧力変動の卓越振動数に影響を及ぼしていると考えられる。

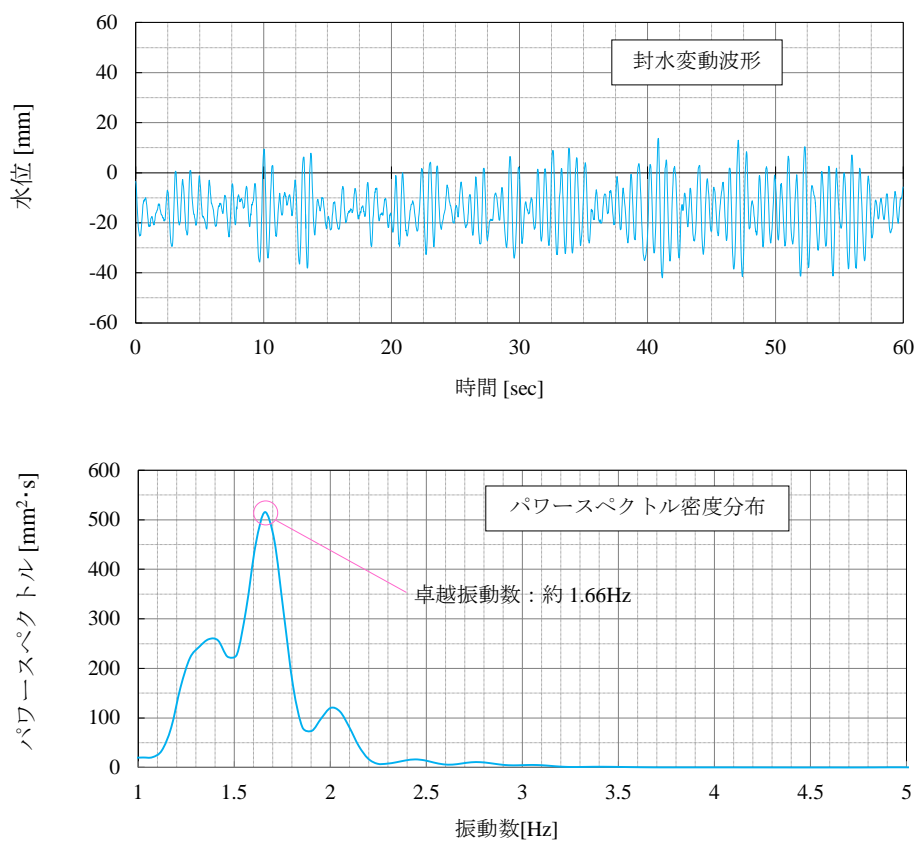
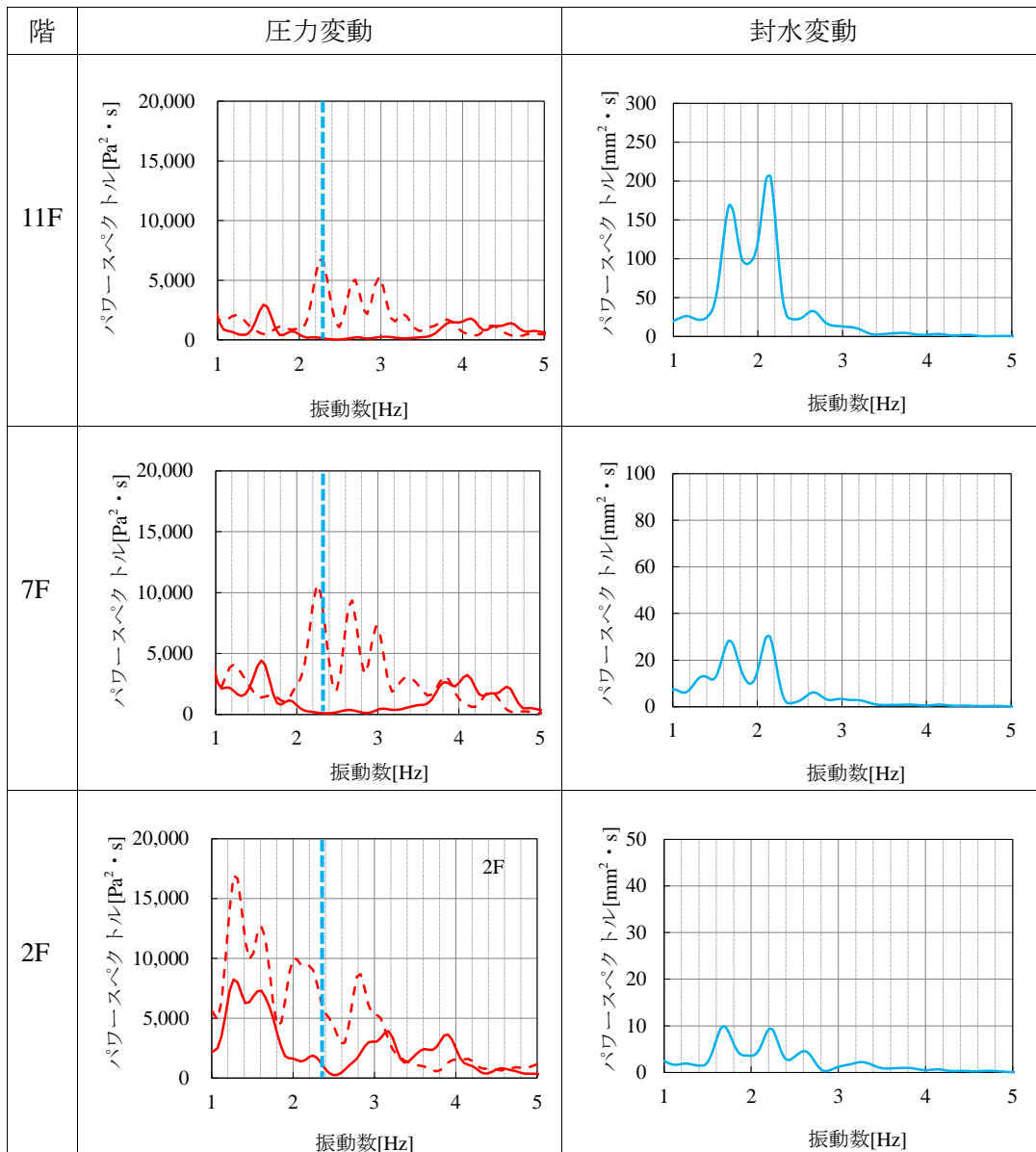


図 3.5-3 封水変動とパワースペクトル密度分布 (30A Pトラップ)

表 3.5-2 各トラップの固有振動数

トラップ	固有振動数[Hz]
75A Pトラップ	1.27
30A Pトラップ	1.66
Sトラップ	2.34
わんトラップ	2.44
逆わんトラップ	2.34
大便器	1.27、2.47



--- トラップ無し
 — わんトラップ
 --- 固有振動数(2.44Hz)

図 3.5-4 パワースペクトル密度分布 (わんトラップ 全階設置)

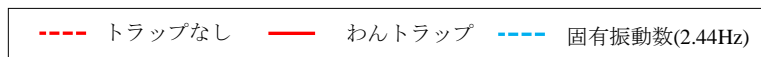
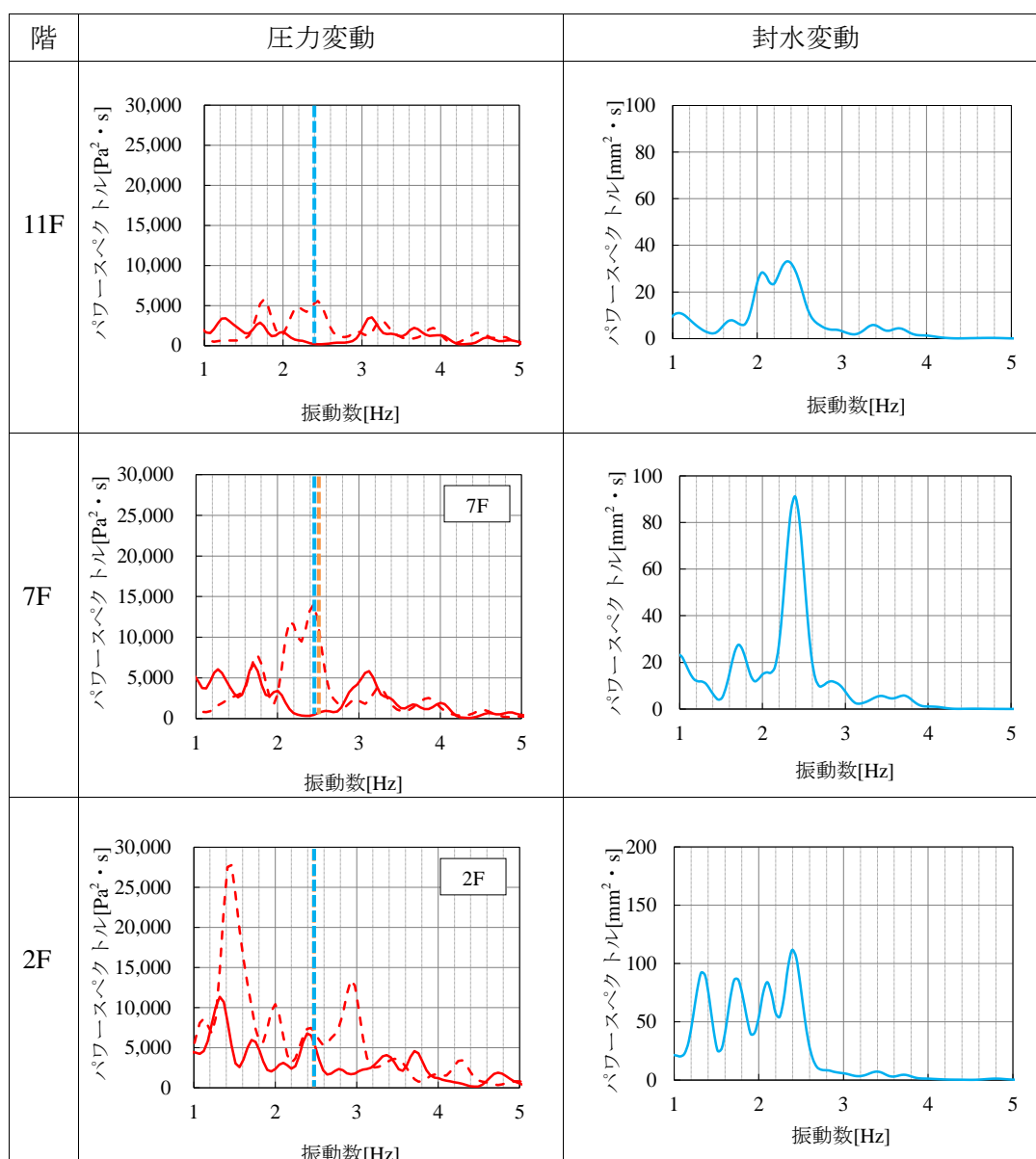
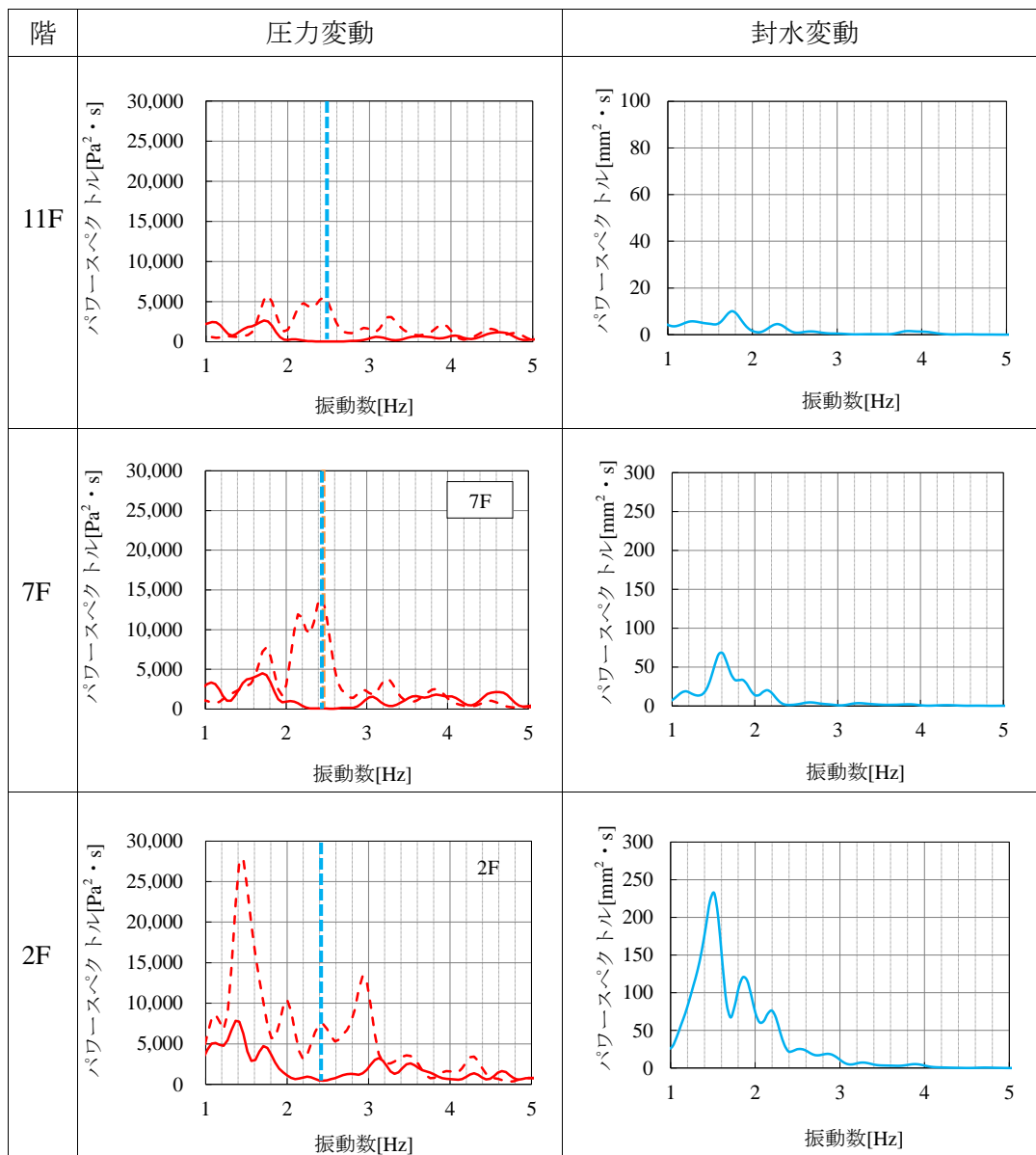
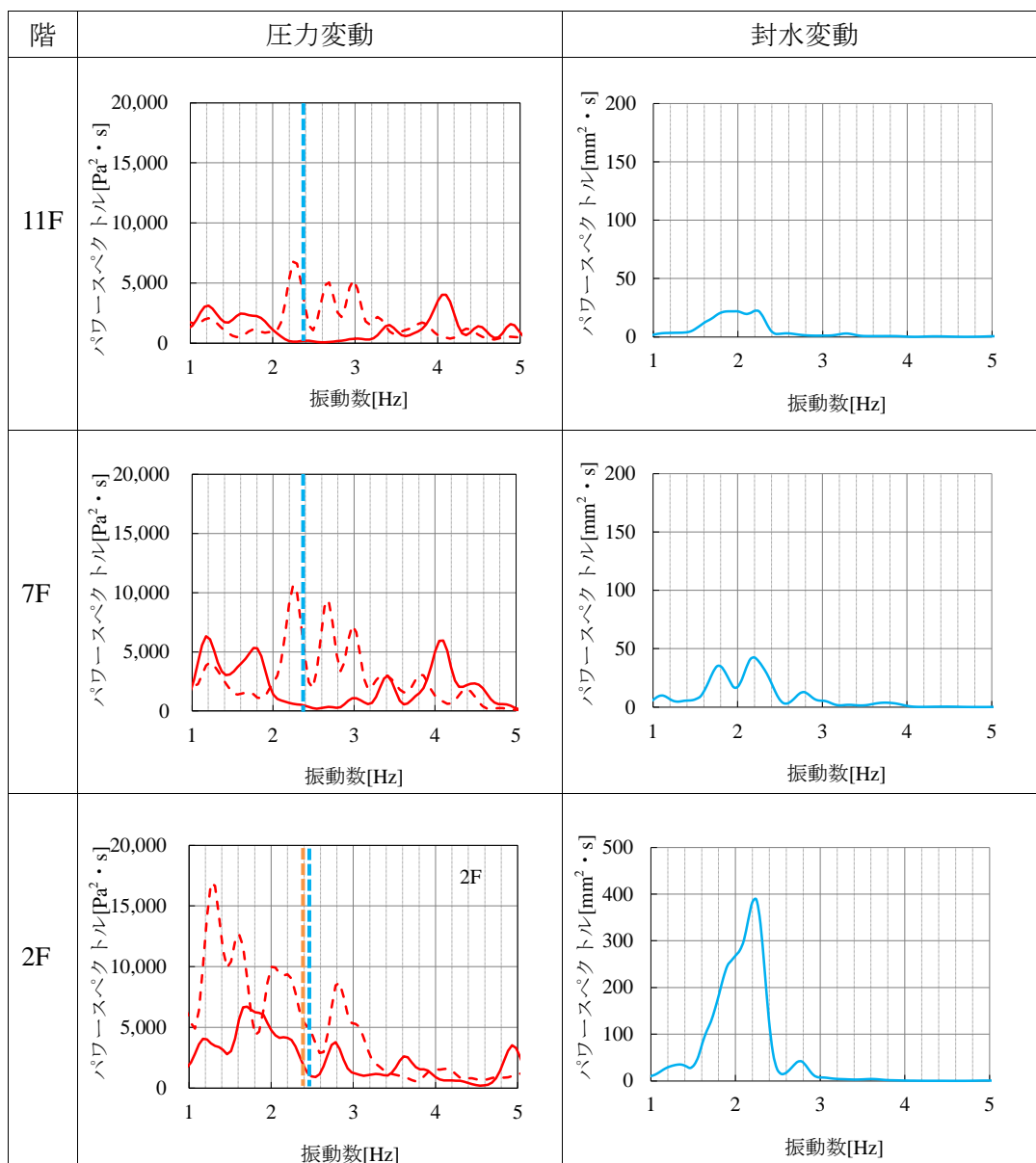


図 3.5-5 パワースペクトル密度分布 (わんトラップ 3 階設置)



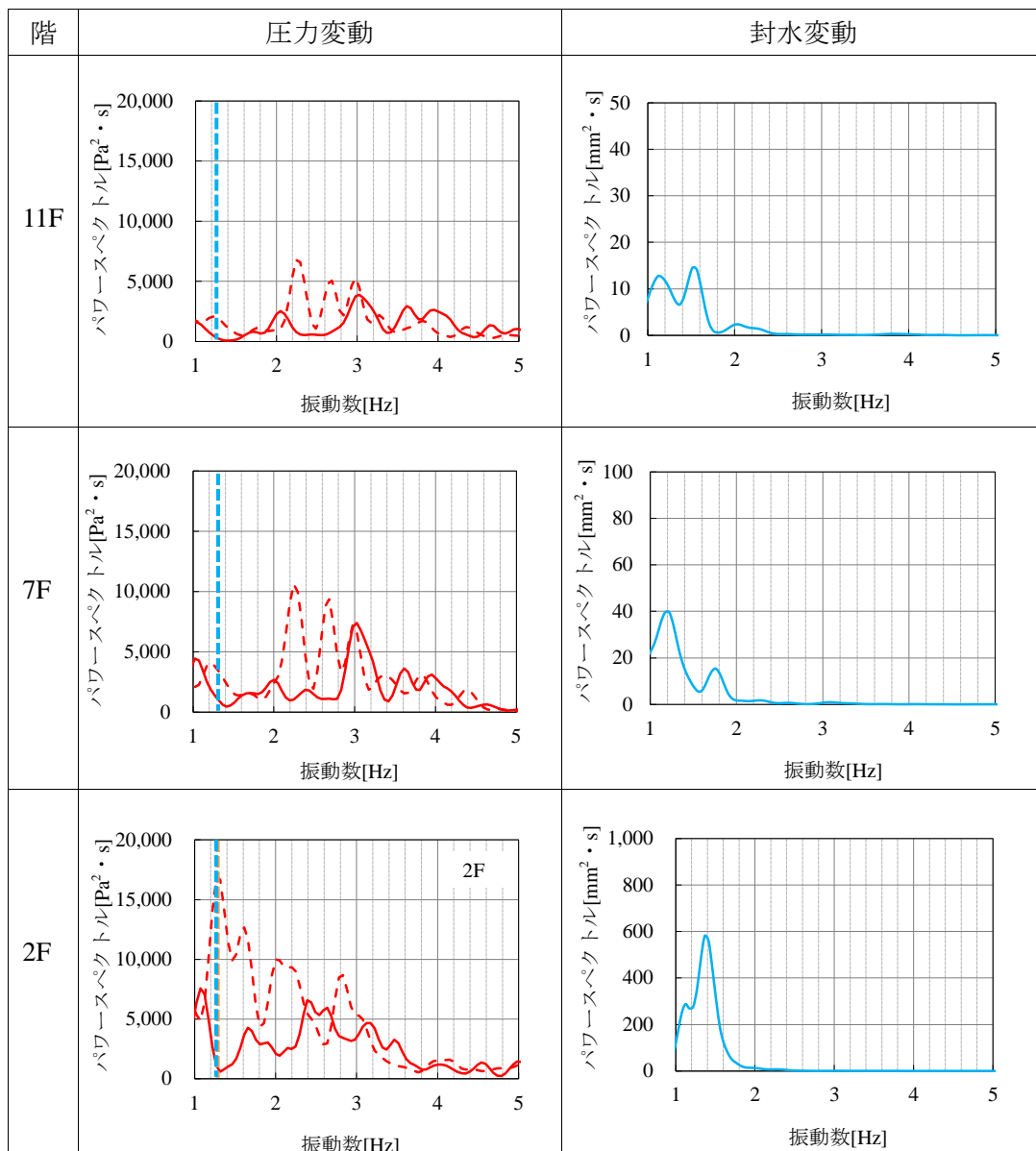
- - - トラップなし
— 4わんトラップ
- - - 固有振動数(2.44Hz)

図 3.5-6 パワースペクトル密度分布 (4わんトラップ3ヶ階設置)



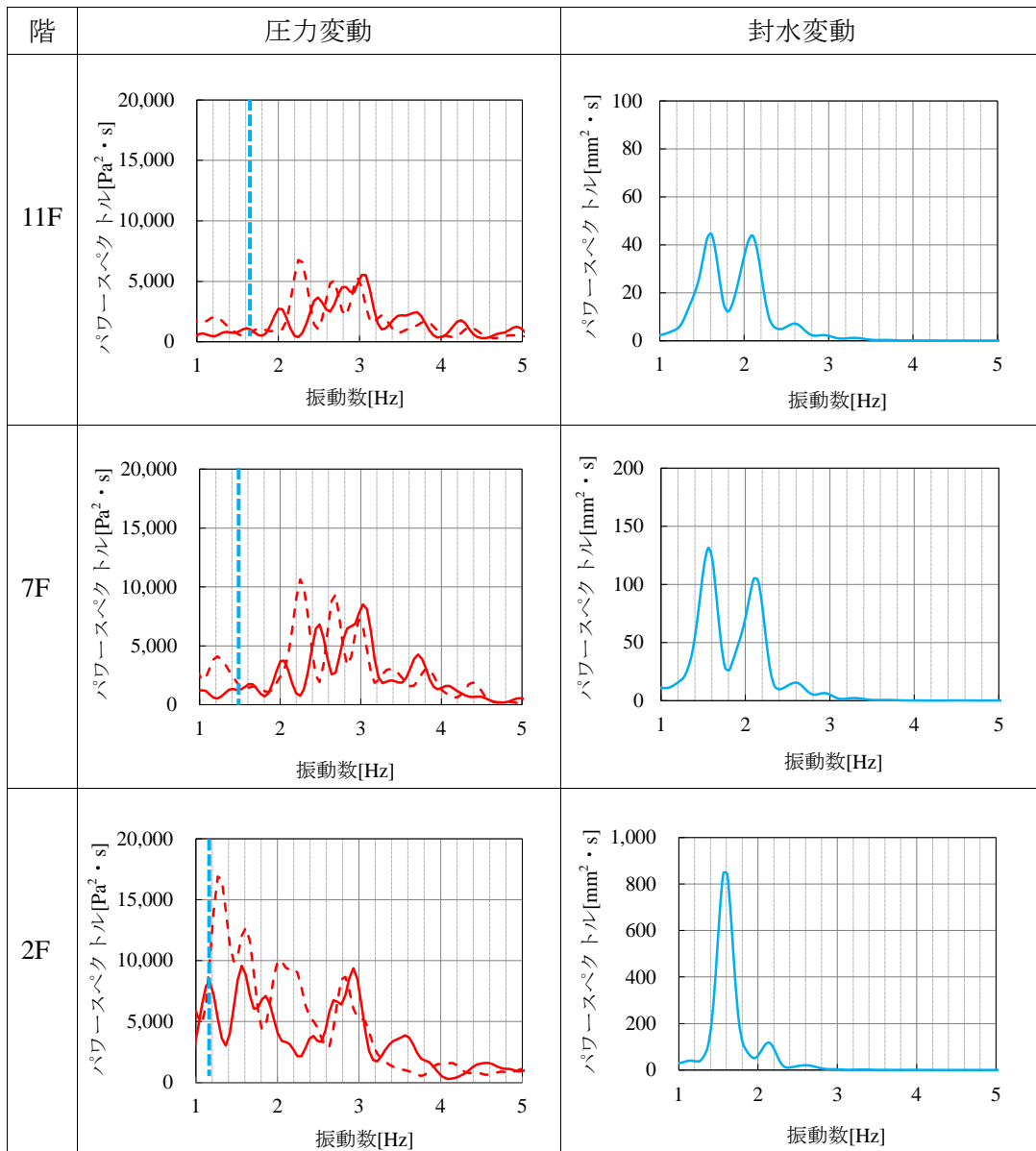
- - - トラップなし
— 逆わんトラップ
- - - 固有振動数(2.34Hz)

図 3.5-7 パワースペクトル密度分布（逆わんトラップ 全階設置）



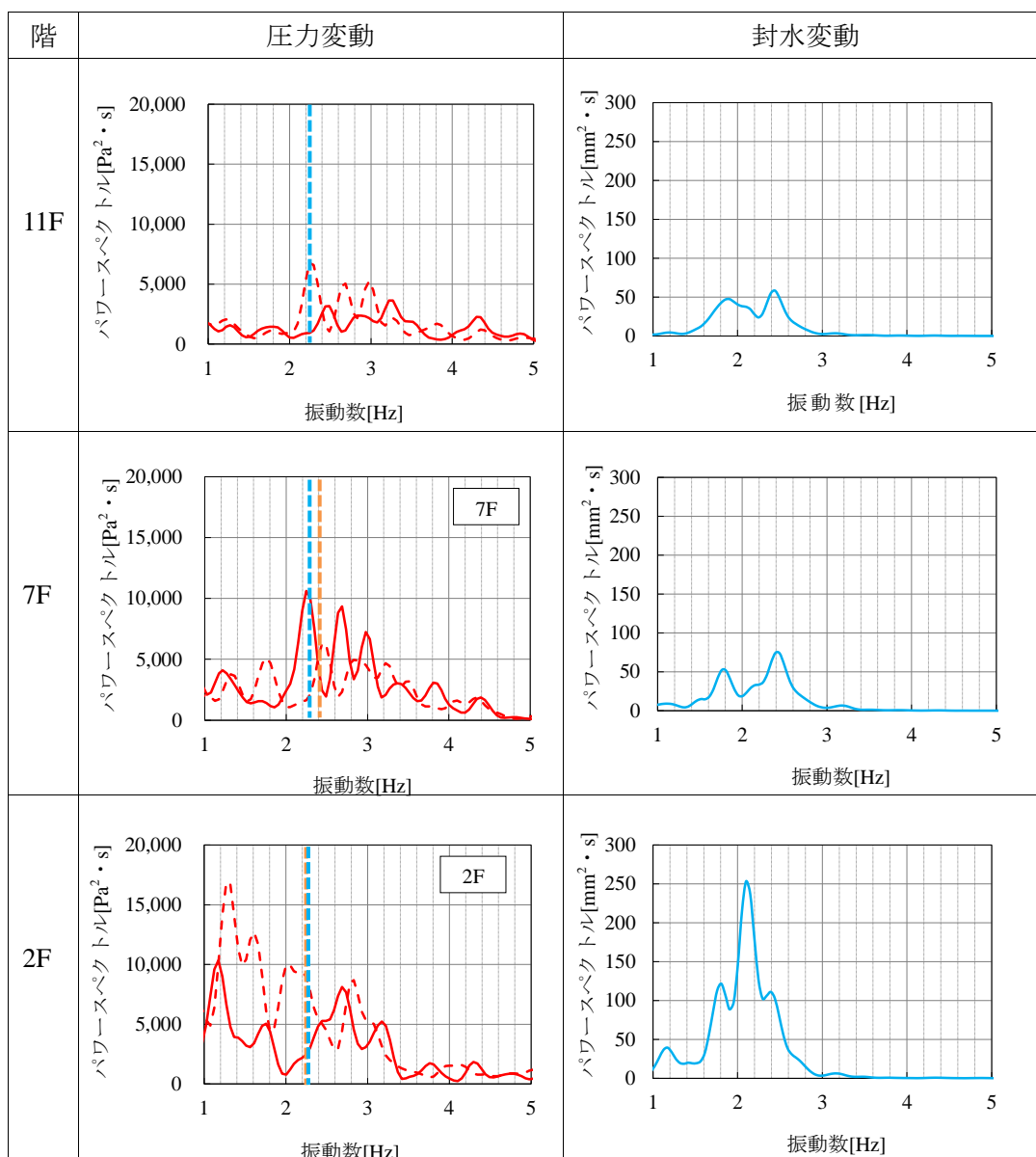
- - - トラップなし
 — 75A Pトラップ
 - - - 固有振動数(1.27Hz)

図 3.5-8 パワースペクトル密度分布 (75A Pトラップ全階設置)



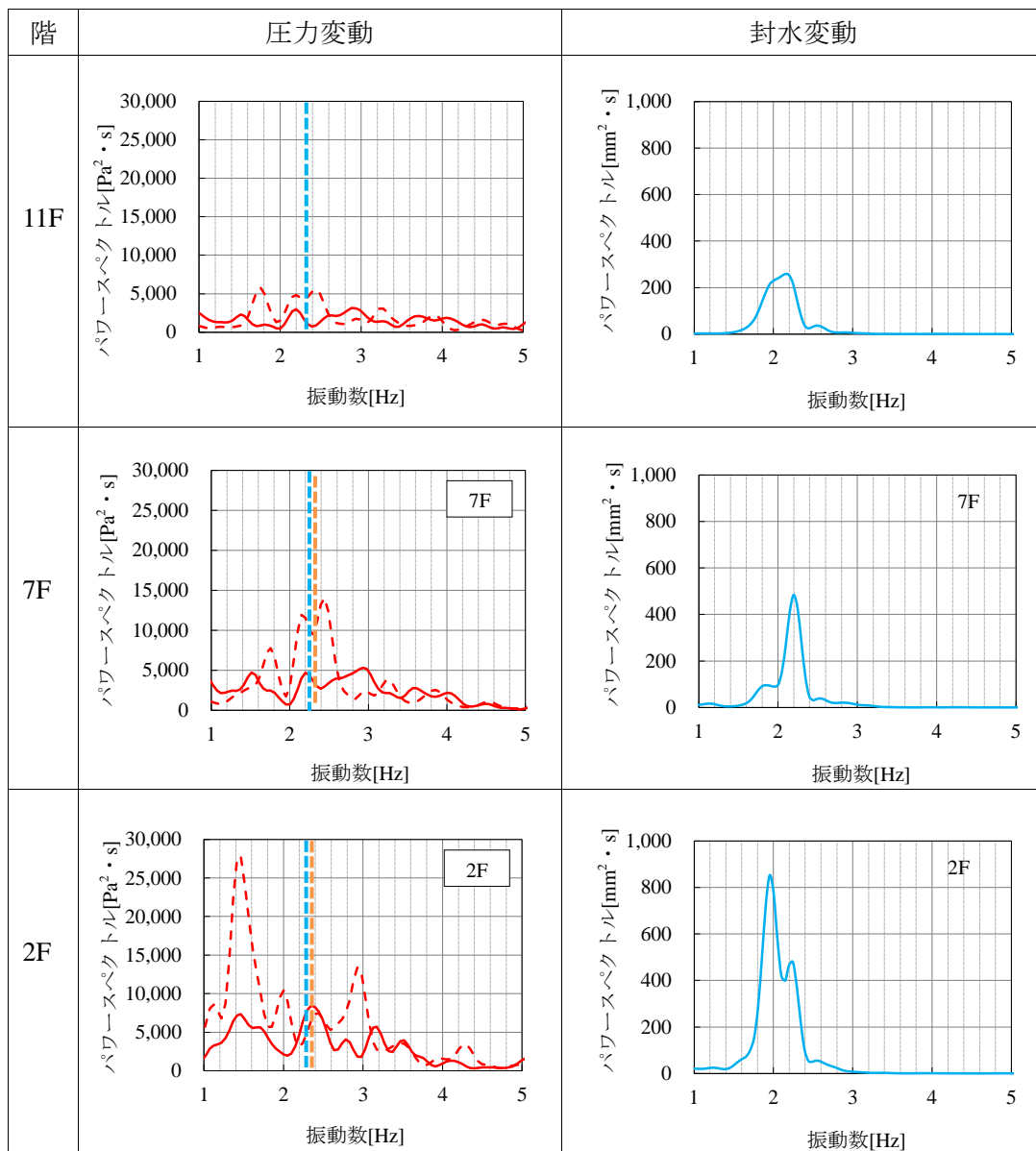
- - - トラップなし
 — 30A Pトラップ
 - - - 固有振動数(1.66Hz)

図 3.5-9 パワースペクトル密度分布 (30A Pトラップ全階設置)



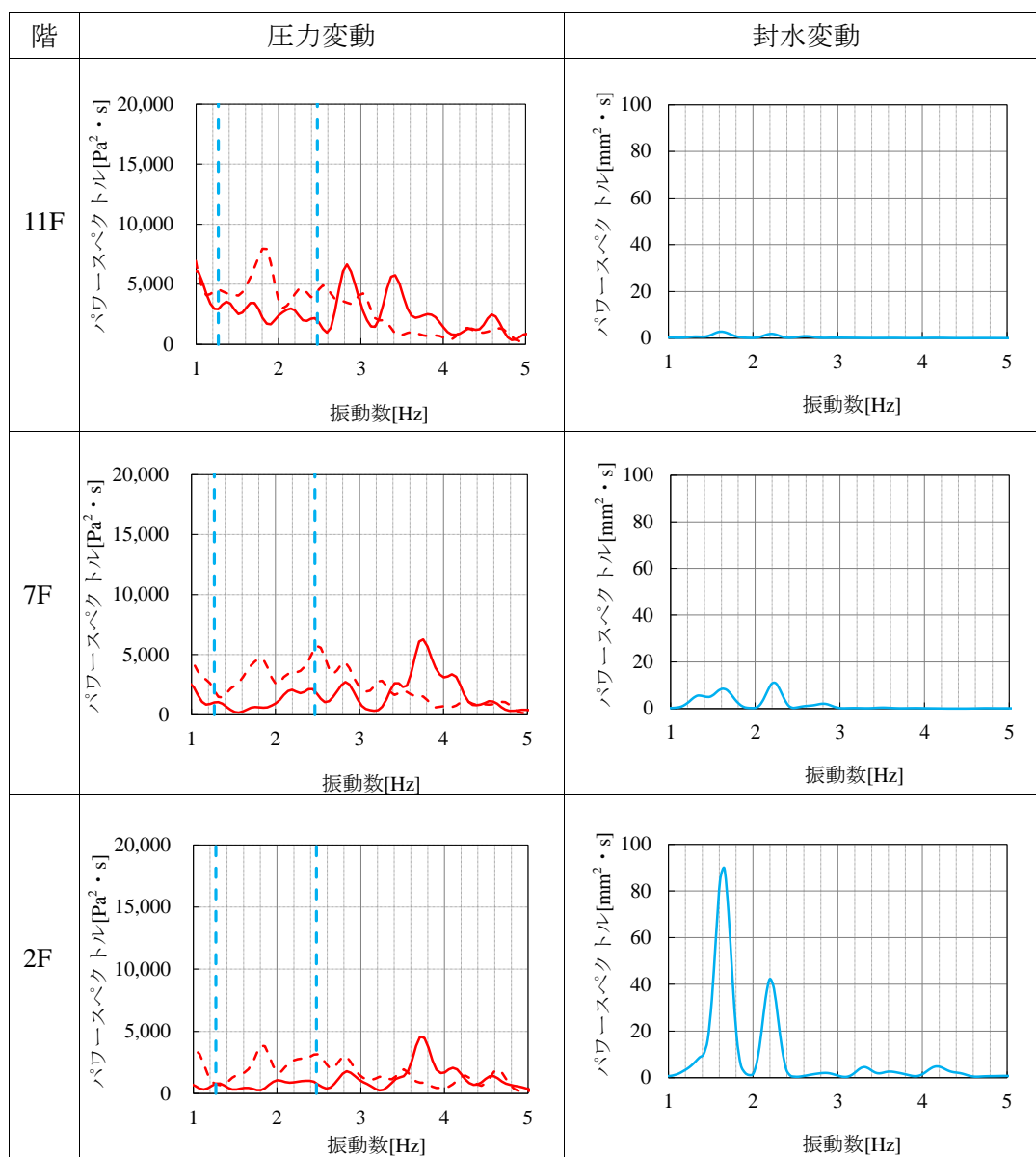
- - - トラップなし — Sトラップ - - - 固有振動数(2.34Hz)

図 3.5-10 パワースペクトル密度分布 (Sトラップ 全階設置)



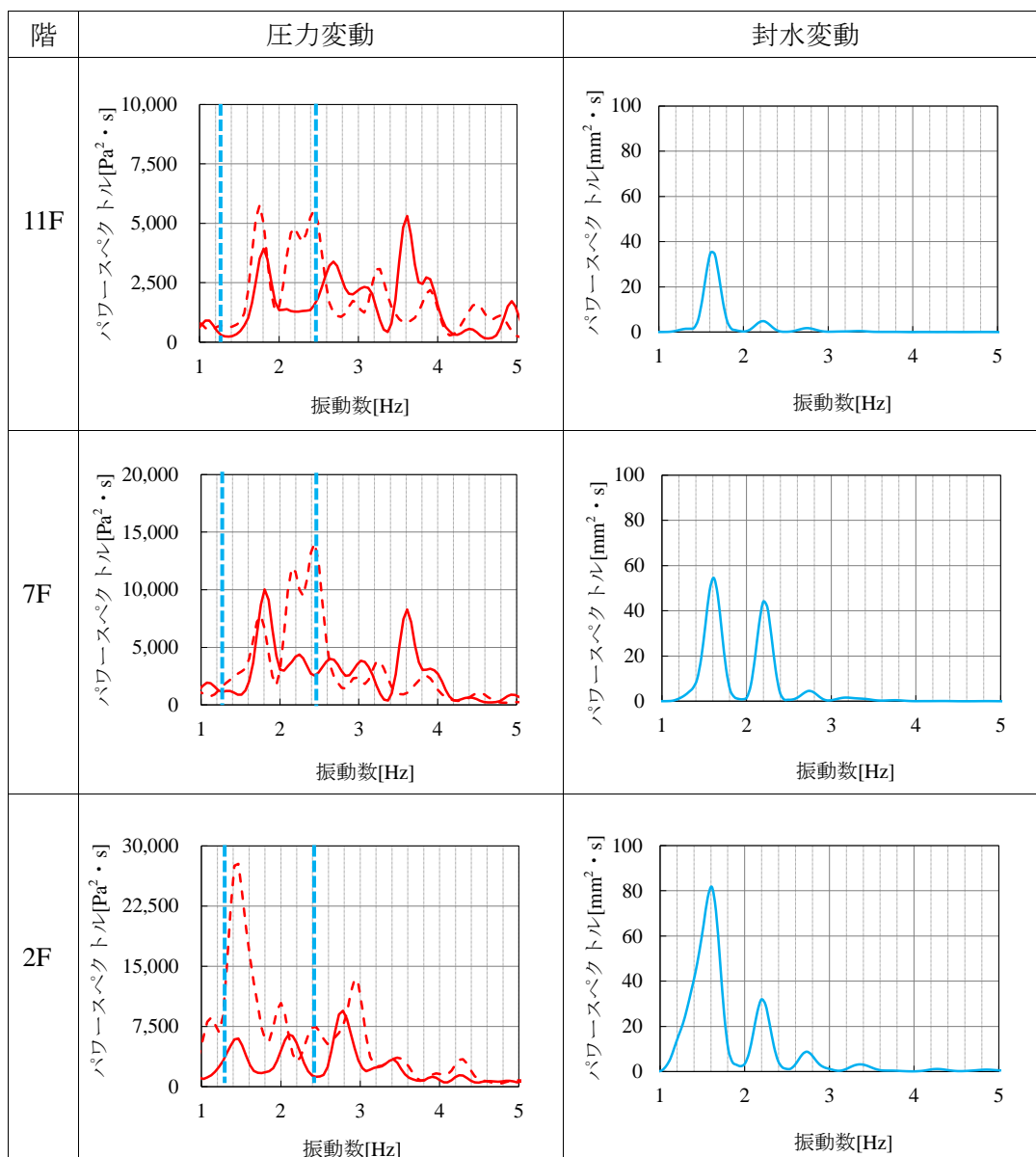
- - - トラップなし — Sトラップ - - - 固有振動数(2.34Hz)

図 3.5-11 パワースペクトル密度分布 (Sトラップ 3ヶ階設置)



- - - トラップなし
 — 大便器
 - - - 固有振動数(1.27、2.47Hz)

図 3.5-12 パワースペクトル密度分布 (大便器 全階設置)



--- トラップなし
 — 大便器
 --- 固有振動数(1.27、2.47Hz)

図 3.5-13 パワースペクトル密度分布（大便器 3ヶ階設置）

第 4 章

負荷形態が管内圧力と封水損失に及ぼす影響

4.1 解析目的

実際の建築物における排水システムでは、器具からの排水が行われるため、瞬時最大流量や排水時間にばらつきがあるが、SHASE-S 218.²⁰⁰⁸の試験時には、試験判定の安全側として仮想の連続流れである定流量排水が採用されている。その理由として、器具排水における試験では、代表器具の選定や複数階からの排水タイミング等の選択肢が多いこと、および実験結果のばらつきが大きいため試行回数を増やす必要があること等、定量的に評価を行うための課題点が多いことが挙げられる。つまり、定流量排水を用いた負荷方法は、あくまで実験用負荷ということになる。

両負荷の対応関係に関する研究は、多くなされているが、最近の水使用器具の変化は著しく、器具平均排水流量や排水時間などの負荷特性も器具によって大きく異なり、今までの対応関係が当てはまらない場合も考えられる。

本章では、節水型大便器による器具排水負荷と定流量排水負荷による管内圧力と封水損失の定量的な比較を行うことを目的に実大排水タワー実験を行い、管内圧力変動と封水変動の解析を行った。

4.2 実大排水タワー実験の概要

4.2.1 実験目的

SHASE-S 218₂₀₀₈に基づく定流量排水負荷と節水型大便器による器具排水負荷を与えた際、各階の排水横枝管における圧力変動と、途中階に設置した供試トラップの封水変動および残留封水深のデータを得ることを目的として実験を行った。

4.2.2 実験排水システム

排水システムの概要を図 4.2-1、4.2-2 に示す。本システムは伸頂通気方式で、15 階規模の中高層用の特殊継手排水システムとする。実験に使用した実大排水実験タワーおよび特殊継手は、3.2 と同様である。実験排水システムは、8、9 階に供試トラップを接続し、2～7 階と 10～12 階は排水横枝管の末端に PVC キャップで蓋をする場合と、2～12 階のすべての階を PVC キャップで蓋をする場合の 2 パターンとした。それぞれをトラップ有り、トラップ無しとする。排水負荷階は 13～15 階を対象とし、負荷形態・負荷量によって変更した。

4.2.3 供試便器と供試トラップ

供試便器と供試トラップの写真を写真 4.2-1、供試トラップの断面形状とパラメータを図 4.2-3、パラメータを表 4.2-2 にそれぞれ示す。供試便器は、大洗浄の洗浄水量が 6.0L/回のサイホン式便器（トルネード洗浄）とした。供試トラップは、供試便器と同様の大便器および逆わんトラップとし、大便器を 9 階、逆わんトラップを 8 階に満水状態で設置した。供試便器と、供試トラップにおける水位センサの設置状況を写真 4.2-2 に示す。

4.2.4 実験方法

(1) 負荷方法

本実験で使用した負荷方法を表 4.2-1 に示す。定流量排水の際は SHASE-S 218₂₀₀₈に基づき、負荷流量 1.5L/s、3.0L/s、4.5L/s とした。器具排水の際は大便器からの大洗浄排水とし、1 台（15 階）、2 台（14、15 階）、3 台（13～15 階）排水とした。排水のタイミングは、測定開始から 5 秒後とし、複数階排水の場合は上階の 1 秒後に直下階の大便器の排水を行った。

(2) 測定方法

各階の排水横枝管（排水立て管の管芯から 500mm の位置の頂部）の圧力変動と、供試トラップの封水変動および残留封水深を測定した。サンプリング周期は 20msec (50Hz) とし、ローパスフィルタは無し状態で測定を行った。測定時間は、定流量排水の場合、負荷流量が定常状態に達してから 1 分間、器具排水の場合には、40 秒とした。測定は、各条件 5 回ずつ行った。

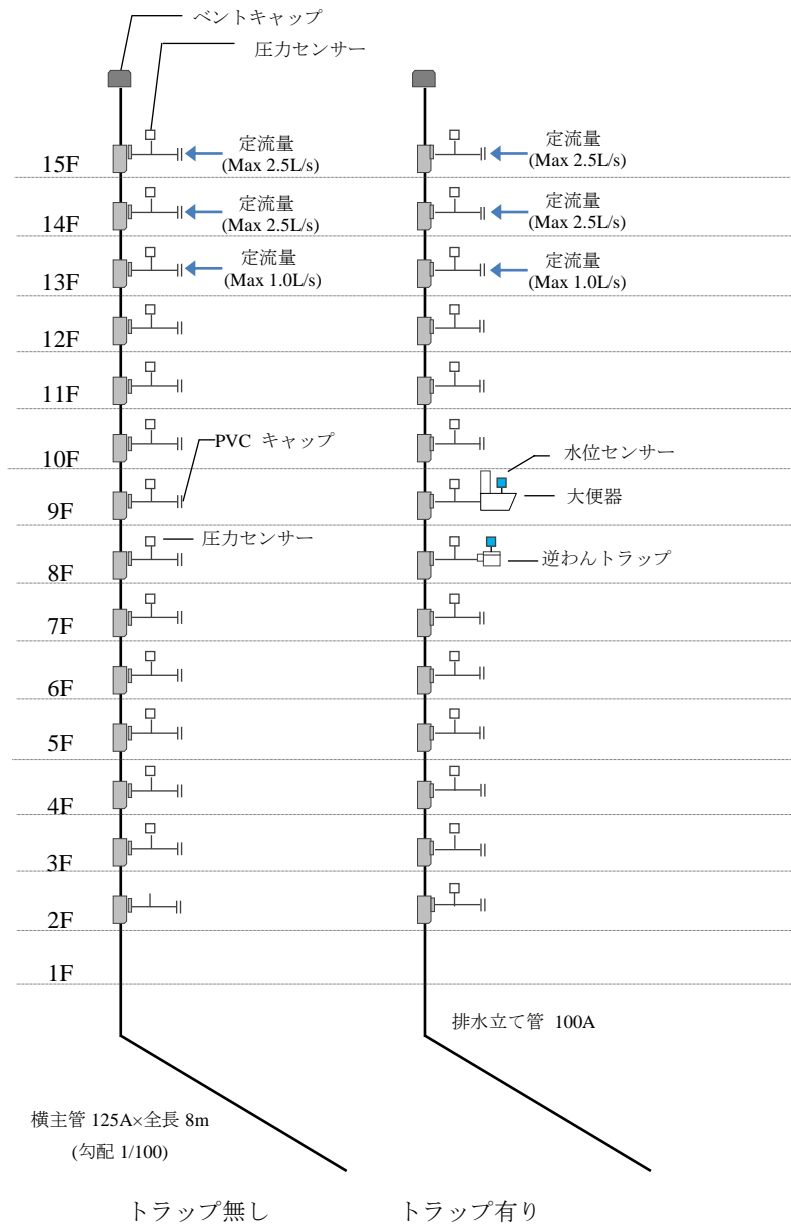


図 4.2-1 実験排水システムの概要(定流量排水負荷)

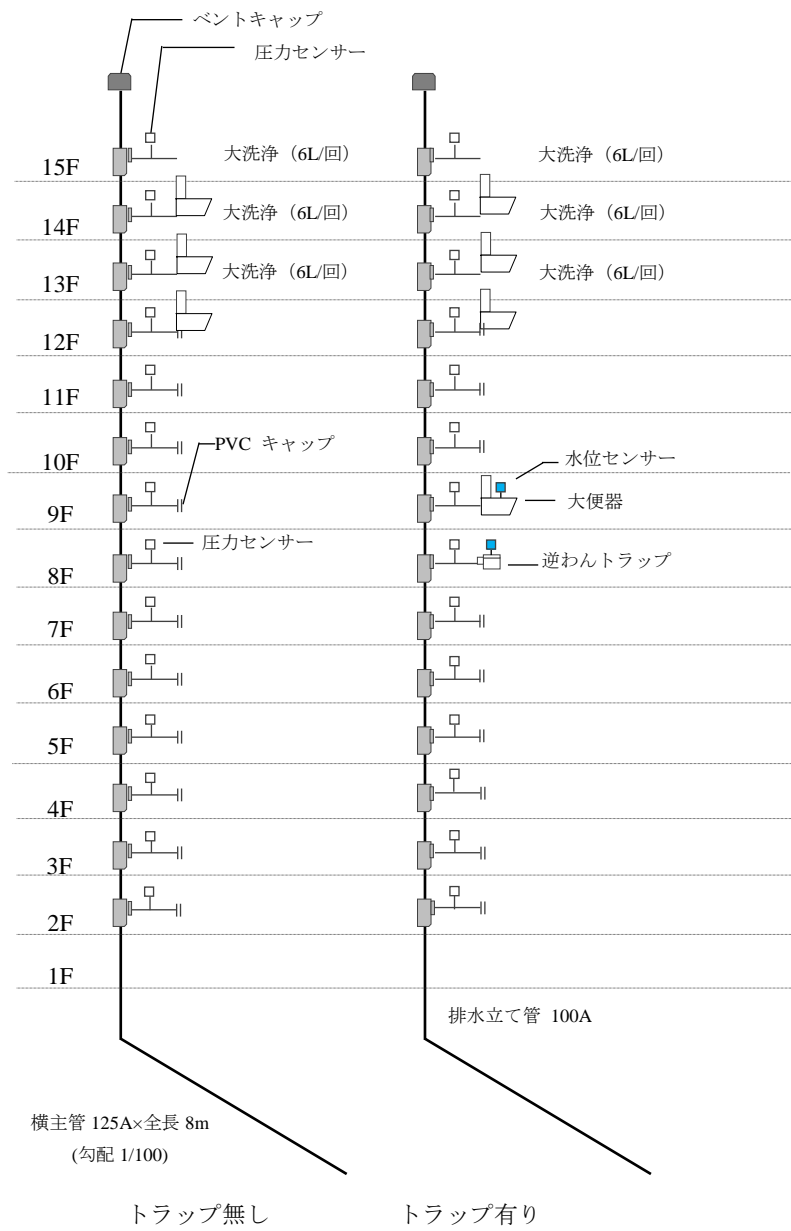


図 4.2-2 実験排水システムの概要 (器具排水負荷)

表 4.2-1 負荷方法

負荷形態	負荷流量[L/s]	負荷台数[台]	負荷階[階]
定流量排水	1.5	-	15
	3.0	-	14, 15
	4.5	-	14, 15
器具排水	-	1	15
	-	2	14, 15
	-	3	13, 14, 15



大便器



逆わんトラップ



供試便器

写真 4.2-1 供試便器と供試トラップ

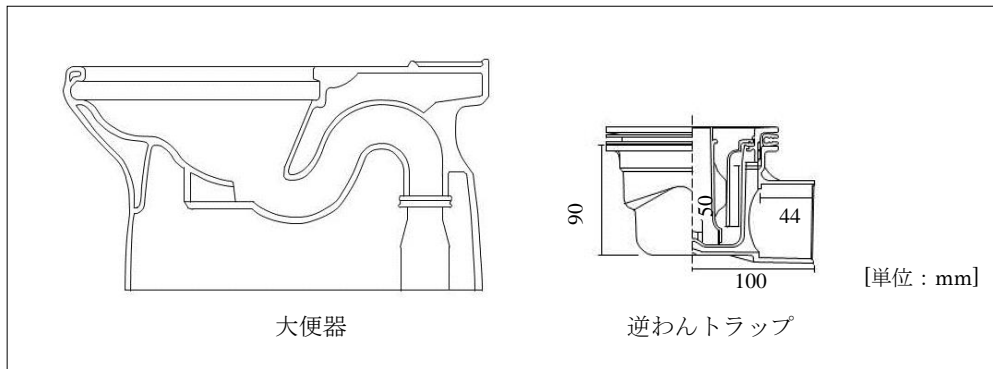


図 4.2-3 供試トラップの断面形状

表 4.2-2 供試便器と供試トラップの基本パラメータ

供試便器 供試トラップ	設置階 [階]	封水深 [mm]	封水量 [mL]	脚断面積比 [-]	固有振動数 [Hz]	器具平均排水流量 [L/s]
大便器	9	58	2,400	0.16	1.27, 2.47	2.2
逆わんトラップ	8	50	330	1	2.34	-

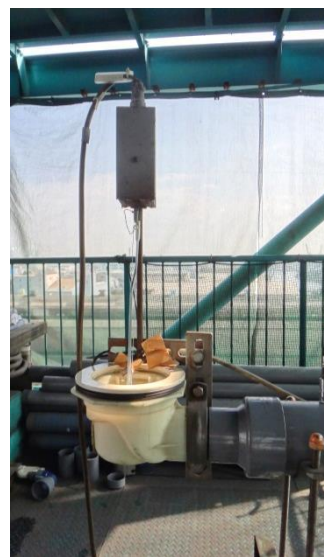


写真 4.2-2 水位センサの設置状況

4.3 管内圧力波形と封水変動波形の比較

4.3.1 解析目的

SHASE-S218₂₀₀₈で規定されている定流量排水と節水型便器を用いた器具排水における管内圧力変動および封水変動を比較した。

4.3.2 解析方法

実験で得られたデータを用いて、定流量排水と器具排水における管内圧力変動波形と封水変動波形を比較した。また、管内圧力と封水の変動幅を定量的に把握するために標準偏差と変動係数（式 4.3-1）を求めて比較を行った。

$$\text{変動係数} = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \quad (4.3-1)$$

ここに、
 $\sigma(x)$: 標準偏差
 \bar{x} : 平均値

4.3.3 解析結果

圧力変動波形と封水変動波形を図 4.3-1、図 4.3-2 に示す。

両排水負荷において、封水変動は圧力変動に応答した波形を示したが、その波形は負荷形態によって大きく異なった。定流量排水では、測定を開始した定常状態時の管内圧力は、8 階、9 階ともに負圧側となっていた。一方、器具排水では、10 秒付近で P_{max} （正圧）、16 秒付近で P_{min} （負圧）となり、25 秒付近からは圧力変動がみられなかった。また、封水変動に関しても定流量排水では、定常状態に達した際（測定開始時）にはすでに封水は減少している状態であったが、器具排水では、排水が通過する直前と考えられる正圧発生時に、封水は管内圧力に応答して振動し、その後、損失を生じた。

両排水負荷における、封水変動を比較すると、8 階に設置した逆わんトラップの封水変動の方が、9 階に設置した大便器のものと比較して振幅が大きくなった。これは、表 4.3-1 に示した封水変動の標準偏差と変動係数からも明らかである。逆わんトラップの標準偏差は、大便器の約 2 倍となっていた。一方、表 4.3-2 に示す圧力変動の標準偏差と変動係数では、8 階、9 階による差はみられなかった。供試トラップによって封水の変動幅が異なった原因として、トラップの構造や封水量が考えられる。

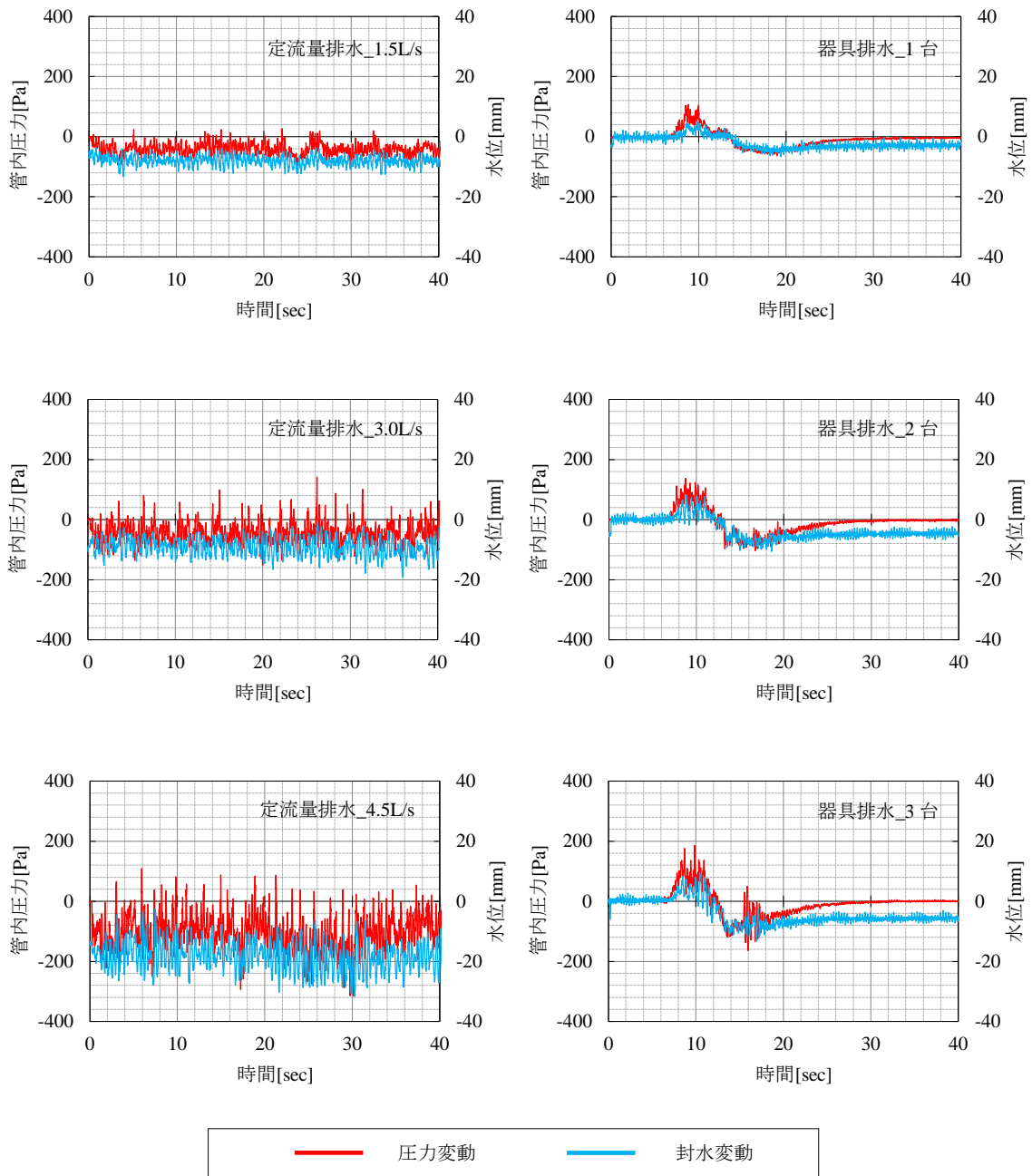


図 4.3-1 压力変動波形と封水変動波形 (8F)

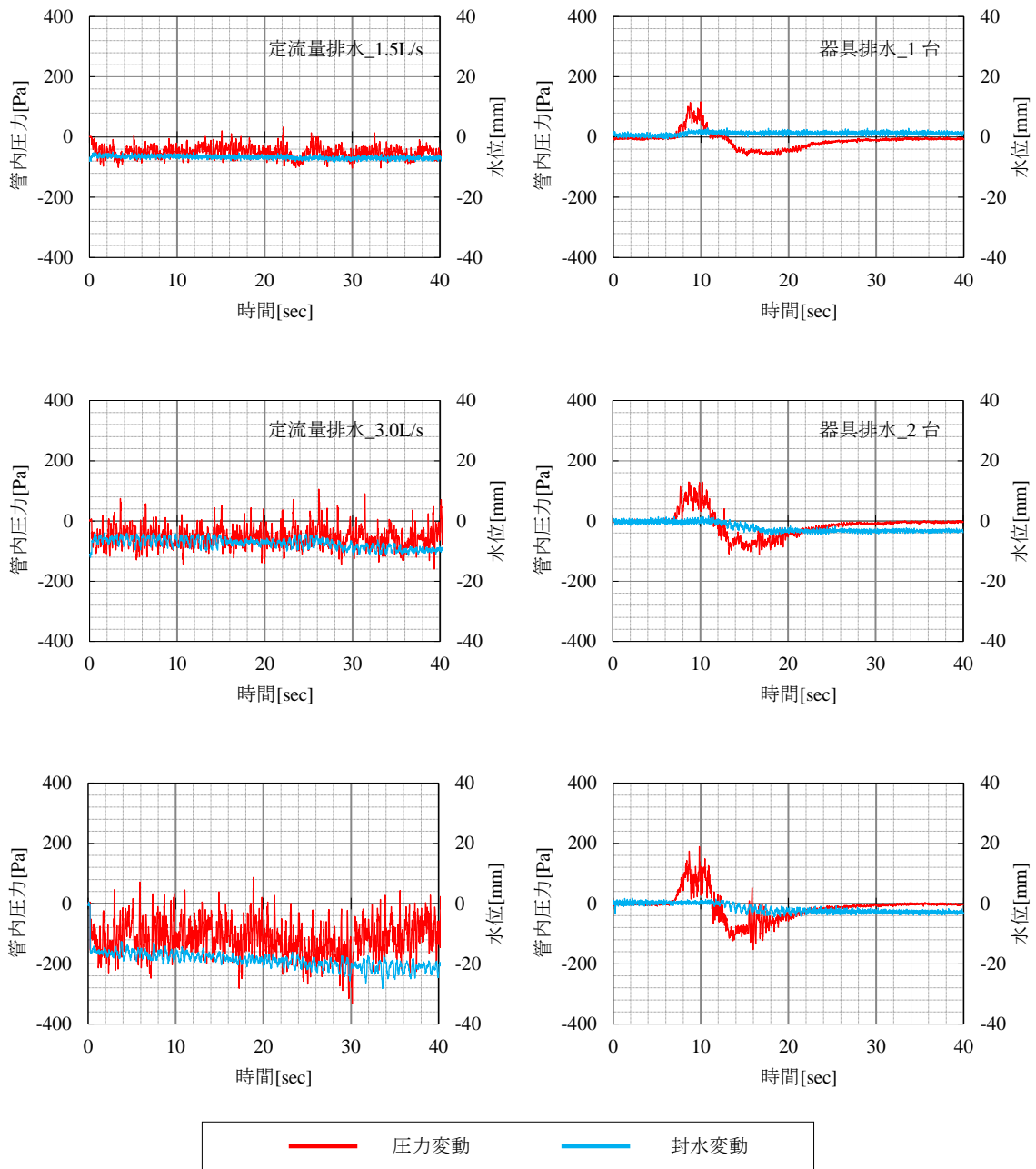


図 4.3-2 圧力変動波形と封水変動波形 (9F)

表 4.3-1 封水変動の標準偏差と変動係数（封水）

負荷形態		標準偏差[mm]		変動係数[-]	
		8F（逆わん）	9F（大便器）	8F（逆わん）	9F（大便器）
定流量排水	1.5L/s	1.4	0.6	0.19	0.09
	3.0L/s	2.7	1.4	0.27	0.15
	4.5L/s	4.8	2.3	0.25	0.12
器具排水	1台	2.1	0.7	1.23	1.10
	2台	3.0	1.5	1.03	0.71
	3台	4.3	1.8	0.90	0.75

表 4.3-2 管内圧力変動の標準偏差と変動係数（管内圧力）

負荷形態		標準偏差[mm]		変動係数[-]	
		8F（逆わん）	9F（大便器）	8F（逆わん）	9F（大便器）
定流量排水	1.5L/s	18.7	18.0	-0.41	-0.33
	3.0L/s	33.5	32.4	-0.66	-0.51
	4.5L/s	56.9	53.8	-0.56	-0.48
器具排水	1台	27.5	28.3	-4.53	-3.69
	2台	36.3	37.6	-5.53	-4.63
	3台	43.1	44.6	-5.24	-4.22

4.4 最大・最小圧力値への影響

4.4.1 解析目的

定流量排水と節水型便器を用いた器具排水における各階管内圧力と負荷流量と最小圧力値の関係を検討する。

4.4.2 解析方法

採取した管内圧力変動のデータに 3Hz ローパスフィルターを施し、定流量排水 1.5L/s、3.0L/s、4.5L/s と、器具排水 1 台、2 台、3 台の管内圧力プロファイル（各階の最大圧力値を P_{max} 、最小圧力値を P_{min} とする）をそれぞれ重ね合わせたグラフ作成し、比較を行った。

また、定流量排水と器具排水における負荷流量と最小圧力の関係を散布図で示し、その一次回帰式の比較を行った。同様に、負荷流量をシステム最小圧力値の関係も検討した。

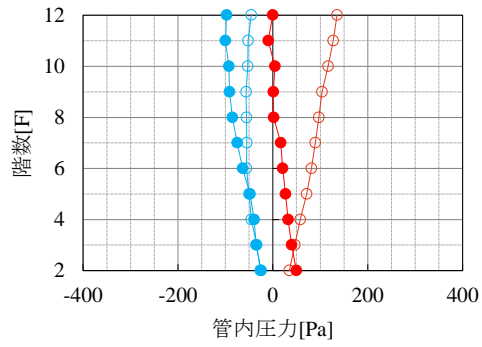
4.4.3 解析結果

定流量排水と器具排水の各階管内圧力プロファイルを図 4.4-1～図 4.4-3 に示す。

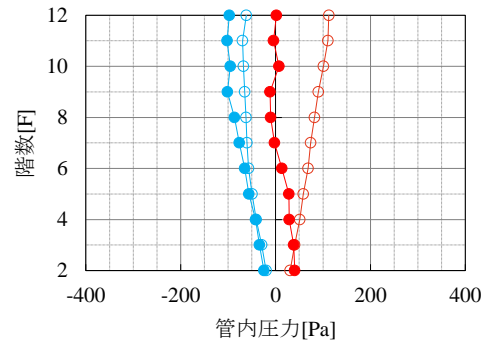
定流量排水では、圧力最小値・最大値共に、上層階では負圧側に、下層になるに従って正圧側による傾向にあり、システム最大圧力値は最下階の 2 階、システム最小圧力値は 10 階または 11 階で発生していた。その一方で、器具排水では、下層になるに従って圧力最小値・最大値は減少する傾向にあった。定流量排水では定常的に最上階層から排水が行われるのに対して、器具排水は大便器の洗浄によって一時的に排水が立て管内を通過するため、各階で発生する最大・最小圧力値の傾向が負荷形態によって異なると考えられる。

各階の定流量排水と器具排水における負荷流量と最小圧力の関係を図 4.4-4、図 4.4-5 に、その一次回帰式の決定係数 R^2 をまとめたものを表 4.4-1 に示す。なお、器具排水の負荷流量は、器具の平均負荷流量とした。そのため、本解析では、器具（大便器）1 台排水の場合の負荷流量を 2.2L/s、2 台排水の場合を 4.4L/s、3 台排水の場合を 6.6L/s とした。表 4.4-1 より、決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに 0.64～0.93 と大きく、負荷流量と最小圧力には高い相関性があることが確認された。また、各負荷方法の一次回帰式の回帰係数 a とまとめたものと、器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α を表 4.4-2 に示す。回帰係数比 α は 1.94～2.68 となり、このことから、負荷流量が同値の場合、定流量排水において発生する最小圧力値は、器具排水のおよそ 2～2.5 倍となることが予測できる。

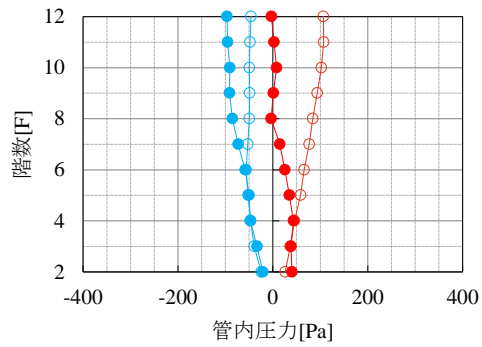
定流量排水と器具排水における負荷流量とシステム最小圧力値の関係を一次回帰式で表した散布図を図 4.4-6 に示す。また、器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α を表 4.4-3 に示す。各階の回帰係数比と同様に、回帰係数比 α は $1.96 \approx 2$ を示したことから、定流量排水において発生するシステム最小圧力値は、器具排水のおよそ 2 倍となることが予測できる。



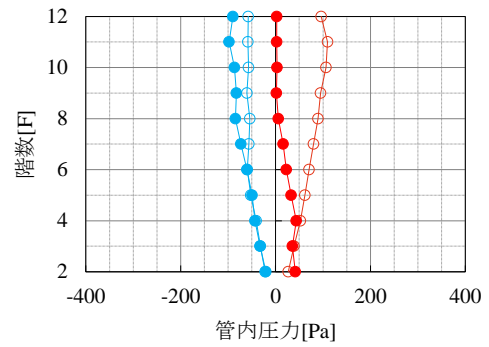
1 回目



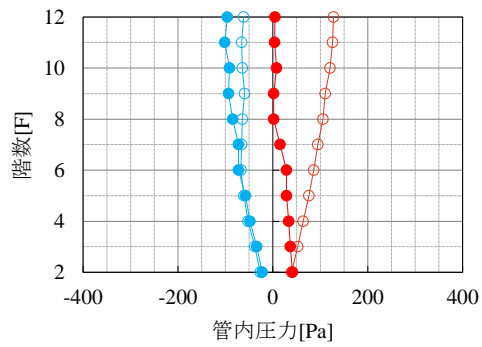
2 回目



3 回目



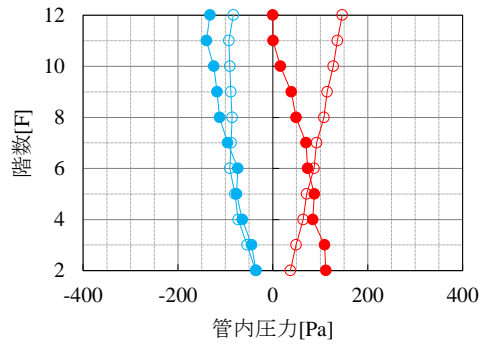
4 回目



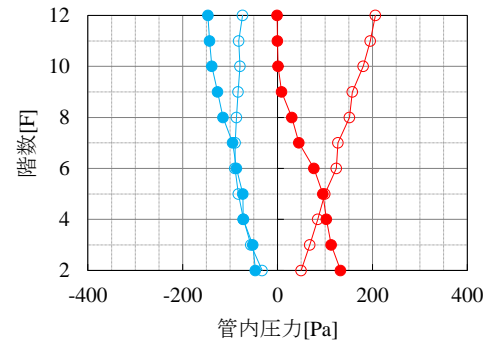
5 回目

	Pmax	Pmin
定流量排水	—●—	—●—
器具排水	—○—	—○—

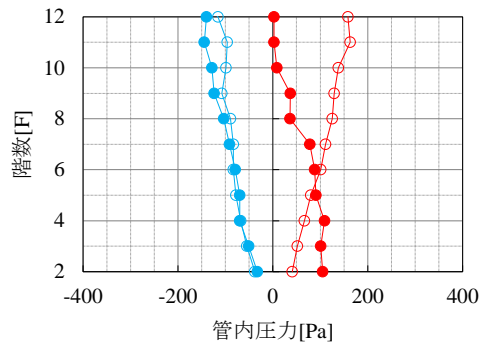
図 4.4-1 管内圧カプロフィール (定流量 1.5L/s、器具 1 台)



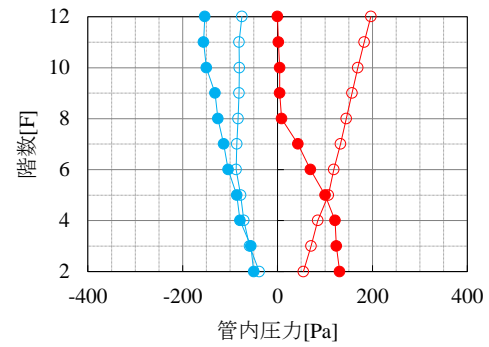
1 回目



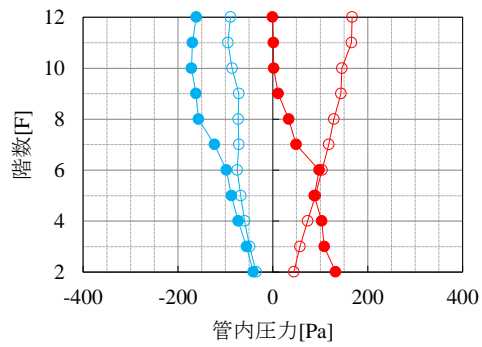
2 回目



3 回目



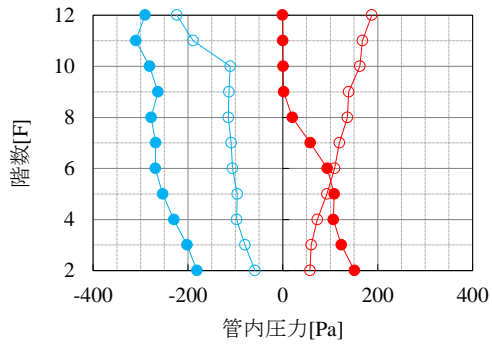
4 回目



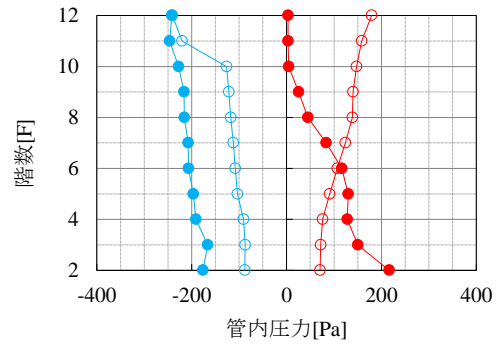
5 回目

	Pmax	Pmin
定流量排水	—●—	—●—
器具排水	—○—	—○—

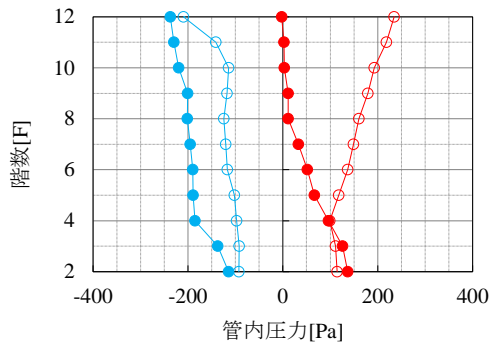
図 4.4-2 管内圧カプロフィール (定流量 3.0L/s、器具 2 台)



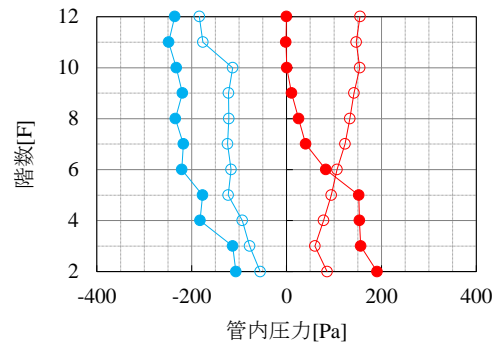
1 回目



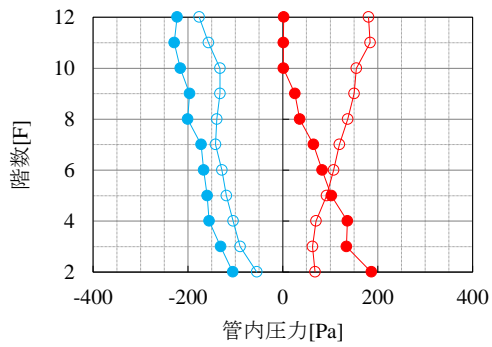
2 回目



3 回目



4 回目



5 回目

	Pmax	Pmin
定流量排水	—●—	—●—
器具排水	—○—	—○—

図 4.4-3 管内圧カプロフィール (定流量 4.5L/s、器具 3 台)

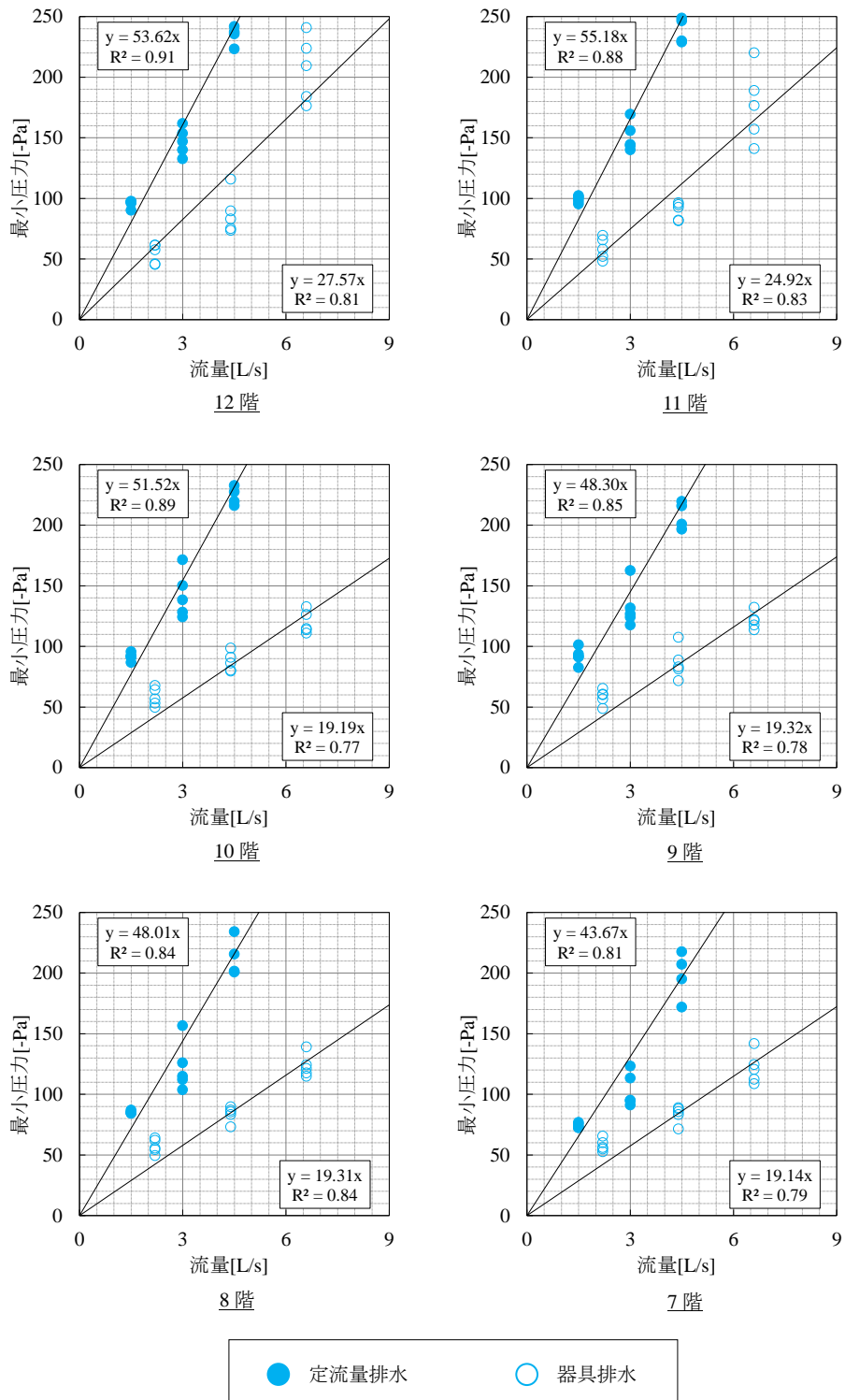


図 4.4-4 負荷流量に対する最小圧力値の散布図 (7~12階)

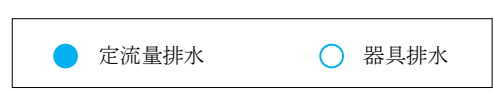
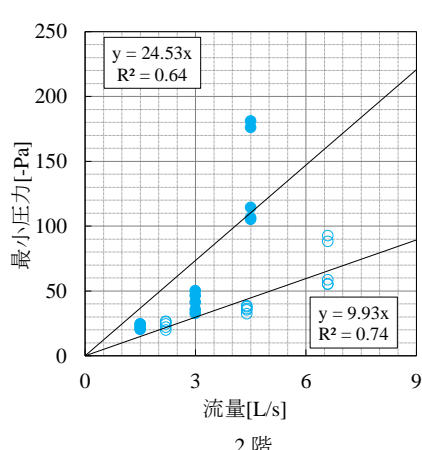
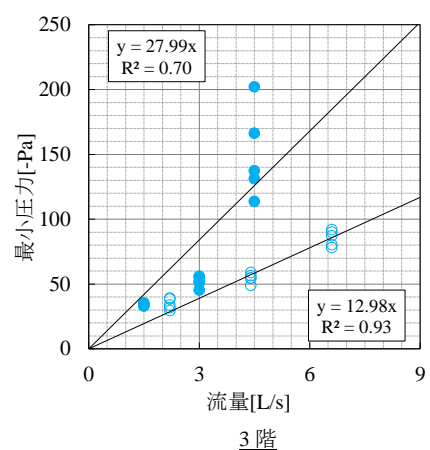
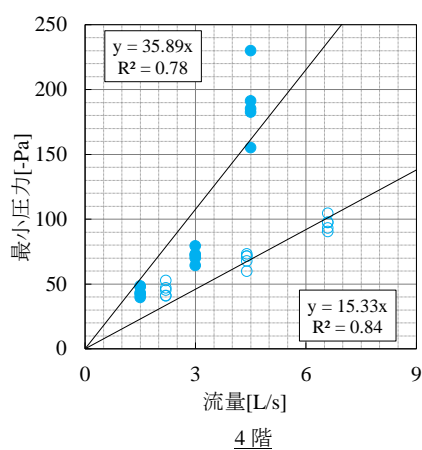
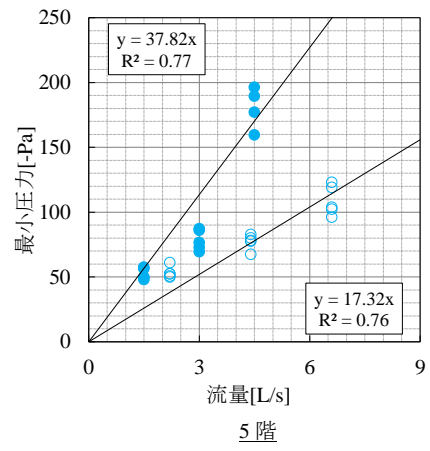
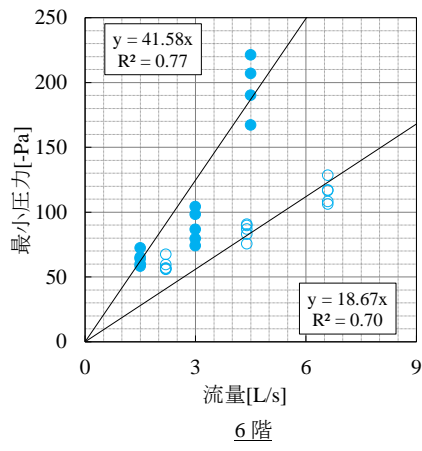


図 4.4-5 負荷流量に対する最小圧力値の散布図 (2~6階)

表 4.4-1 負荷流量と最小圧力値の決定係数 R^2

階数[F]	負荷形態	
	定流量排水	器具排水
12	0.91	0.81
11	0.88	0.83
10	0.89	0.77
9	0.85	0.78
8	0.84	0.84
7	0.81	0.79
6	0.77	0.70
5	0.77	0.76
4	0.78	0.84
3	0.70	0.93
2	0.64	0.74

表 4.4-2 器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α (各階)

階数[F]	回帰係数 a		回帰係数比 α
	定流量排水	器具排水	
12	53.62	27.57	1.94
11	55.18	24.92	2.21
10	51.52	19.19	2.68
9	48.30	19.32	2.50
8	48.01	19.31	2.49
7	43.67	19.14	2.28
6	41.58	18.67	2.23
5	37.82	17.32	2.18
4	35.89	15.33	2.34
3	27.99	12.98	2.16
2	24.53	9.93	2.47
平均値	42.56	18.52	2.32

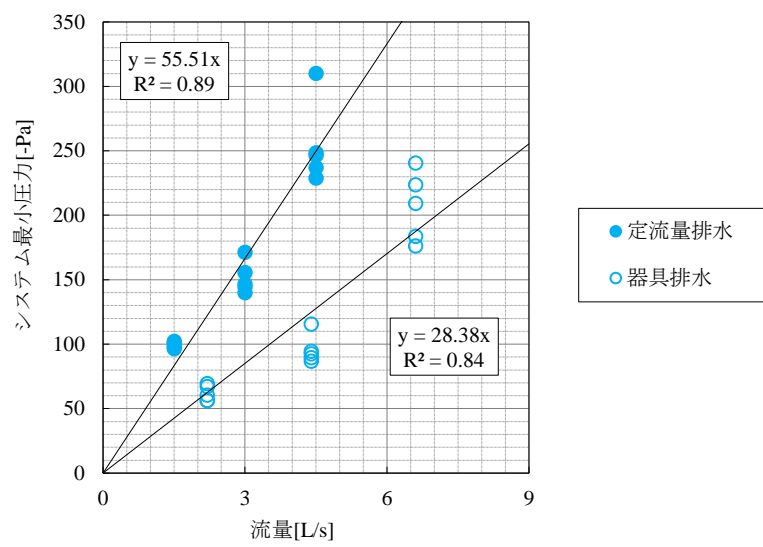


図 4.4-6 負荷流量に対するシステム最小圧力値の散布図

表 4.4-3 器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α (システム)

負荷形態	回帰係数 a	回帰係数比 α
定流量排水	55.51	1.96
器具排水	28.38	

4.5 最小圧力値と封水損失の関係

4.5.1 解析目的

定流量排水と器具排水における 8 階、9 階の最小圧力値と供試トラップの封水損失の関係を調べ、比較を行った。

4.5.2 解析方法

3Hz ローパスフィルターを施した管内圧力変動のデータから 8 階と 9 階の最小圧力値を求め、封水損失との相関性を検討した。

4.5.3 解析結果

8 階と 9 階のトラップの封水損失を表 4.5-1、表 4.5-2 に示す。

各トラップの定流量排水と器具排水における封水損失を比較すると、定流量排水の封水損失の方が大きい傾向となった。また、定流量排水においては、9 階に設置した大便器の方が封水損失は大きいのに対して、器具排水では、8 階に設置した逆わんトラップの方が封水損失は大きくなった。このことから、排水負荷形態によって、トラップの耐圧力性能は異なることが考えられる。

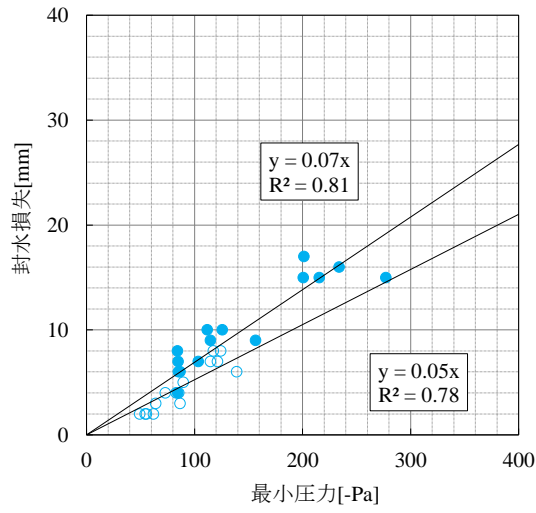
各階の定流量排水と器具排水における最小圧力値と封水損失の関係を一次回帰式で表した散布図を図 4.5-1 に示す。また、一次回帰式の回帰係数 a と器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α を表 4.5-3 に示す。図 4.5-1 より、決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに 0.64~0.90 と大きく、最小圧力と封水損失には高い相関性があることが確認できた。表 4.5-3 より、回帰係数比 α は、逆わんトラップ（8 階）で 1.32、大便器（9 階）で 2.91 となった。これより、同程度の最小圧力値が発生した際、定流量排水における封水損失は、逆わんトラップの場合およそ 1.3 倍となり、大便器の場合およそ 3 倍となることが予測できる。最小圧力値と封水損失の回帰係数比には、供試トラップによって大きな差があったことから、一般的な定義づけを行うことは難しいと考えられる。

表 4.5-1 8階（逆わんトラップ）の封水損失[mm]

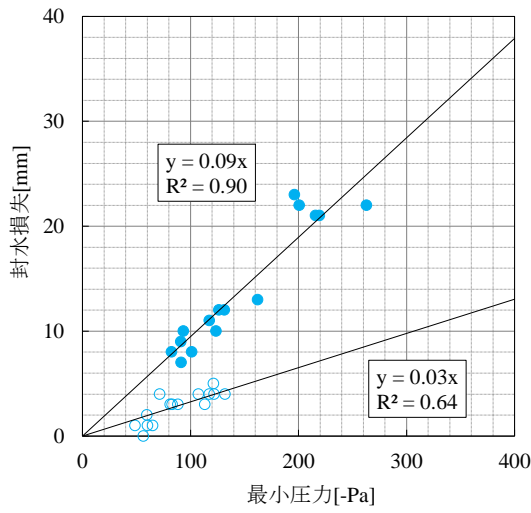
実験回数 [回]	定流量排水			器具排水		
	1.5L/s	3.0L/s	4.5L/s	1台	2台	3台
1	7	10	15	2	4	7
2	6	9	15	2	3	8
3	6	7	17	2	5	8
4	4	10	16	2	4	7
5	8	9	15	3	4	6
平均	6	9	16	2	4	7

表 4.5-2 9階（大便器）の封水損失[mm]

実験回数 [回]	定流量排水			器具排水		
	1.5L/s	3.0L/s	4.5L/s	1台	2台	3台
1	7	11	22	0	3	3
2	8	12	21	1	3	5
3	9	10	22	1	4	4
4	8	12	21	1	3	4
5	10	13	23	2	4	4
平均	8	12	22	1	3	4



8F (逆わん)



9F (大便器)



図 4.5.1 最小圧力値に対する封水損失

表 4.5-3 器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α (最小圧力-封水損失)

階数[F]	回帰係数 a		回帰係数比 α
	定流量排水	器具排水	
8F(逆わん)	0.069	0.053	1.32
9F(大便器)	0.095	0.033	2.91

4.6 トラップの有無による比較

4.6.1 管内圧力の比較

(1) 解析目的

トラップ有りとはトラップ無しの実験排水システムを用いた定流量排水および器具排水の管内圧力変動データの解析を行うことにより、負荷形態の異なる場合のトラップの有無が管内圧力に及ぼす影響を検討した。

(2) 解析方法

実験で得られた定流量排水と器具排水における管内圧力変動のデータに 3Hz ローパスフィルターを施し、トラップ有りとはトラップ無しの各階管内圧力プロファイルを重ね合わせたグラフを作成した。トラップ有りの各階の最大圧力値を P_{1max} 、平均圧力値を P_{1ave} 、最小圧力値を P_{1min} とし、同様にトラップ無しの各階圧力値を P_{0max} 、 P_{0ave} 、 P_{0min} とする。また、各階における圧力変動の標準偏差も求めた。

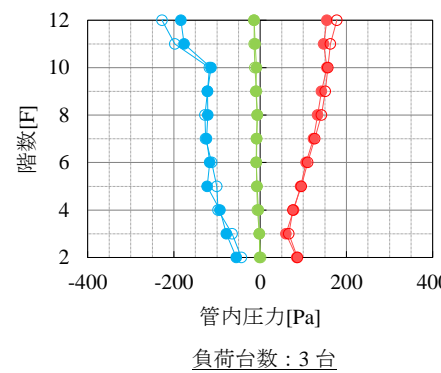
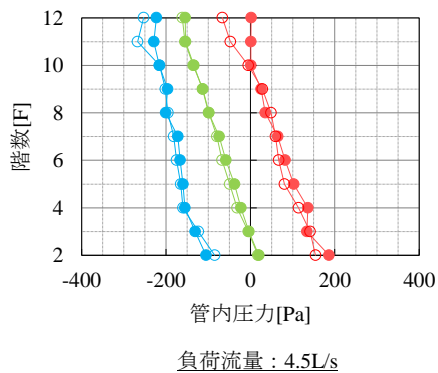
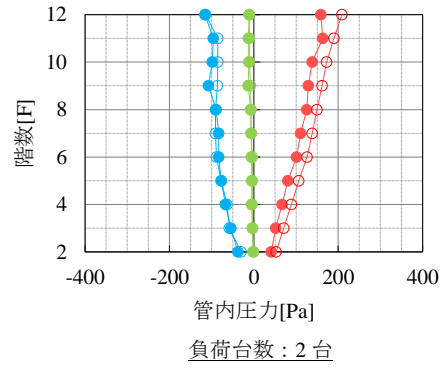
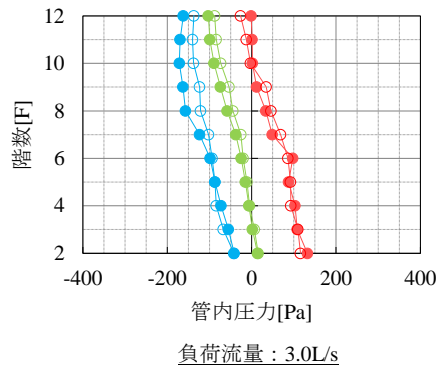
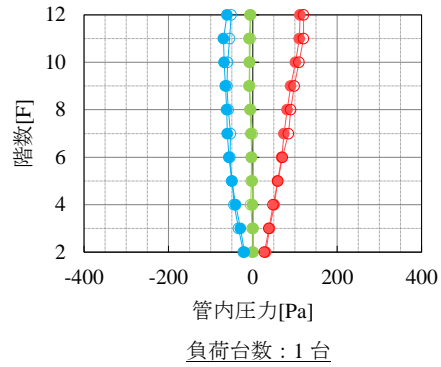
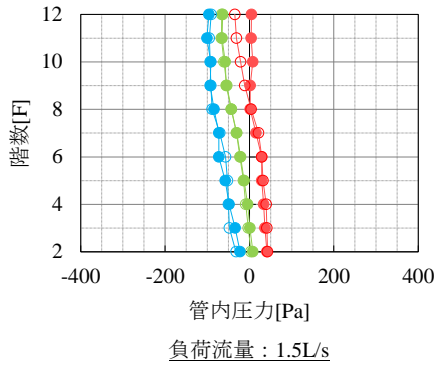
(3) 解析結果

定流量排水と器具排水の各階管内圧力プロファイルを図 4.6-1、図 4.6-2 に示す。両排水負荷において、トラップの有無による管内圧力の大きな変化はみられなかった。各階の管内圧力変動の標準偏差を表 4.6-1 に示す。管内圧力変動の標準偏差からも、トラップの有無による差異はみられなかった。その原因として、定流量排水では本実験で用いた負荷流量が 1.5～4.5L/s と小さかったこと、器具排水では圧力変動が発生する時間が短いこと、さらには、システムに設置したトラップが 8 階と 9 階のみであったことが考えられる。

また、各排水負荷におけるトラップ無しの場合の標準偏差に対するトラップ有りの場合の標準偏差を低減率で表し、まとめたものを表 4.6-1 に示す。8 階と 9 階はトラップが設置されているにもかかわらず、低減率が 1 前後とトラップの設置に関する変化がない階と変わらなかったため、本実験での管内圧力変動の低減がみられなかったことが定量的に確認できた。

定流量排水

器具排水



	P_{max}	P_{ave}	P_{min}
トラップ有り	●	●	●
トラップ無し	○	○	○

図 4.6-1 管内圧カプロフィール

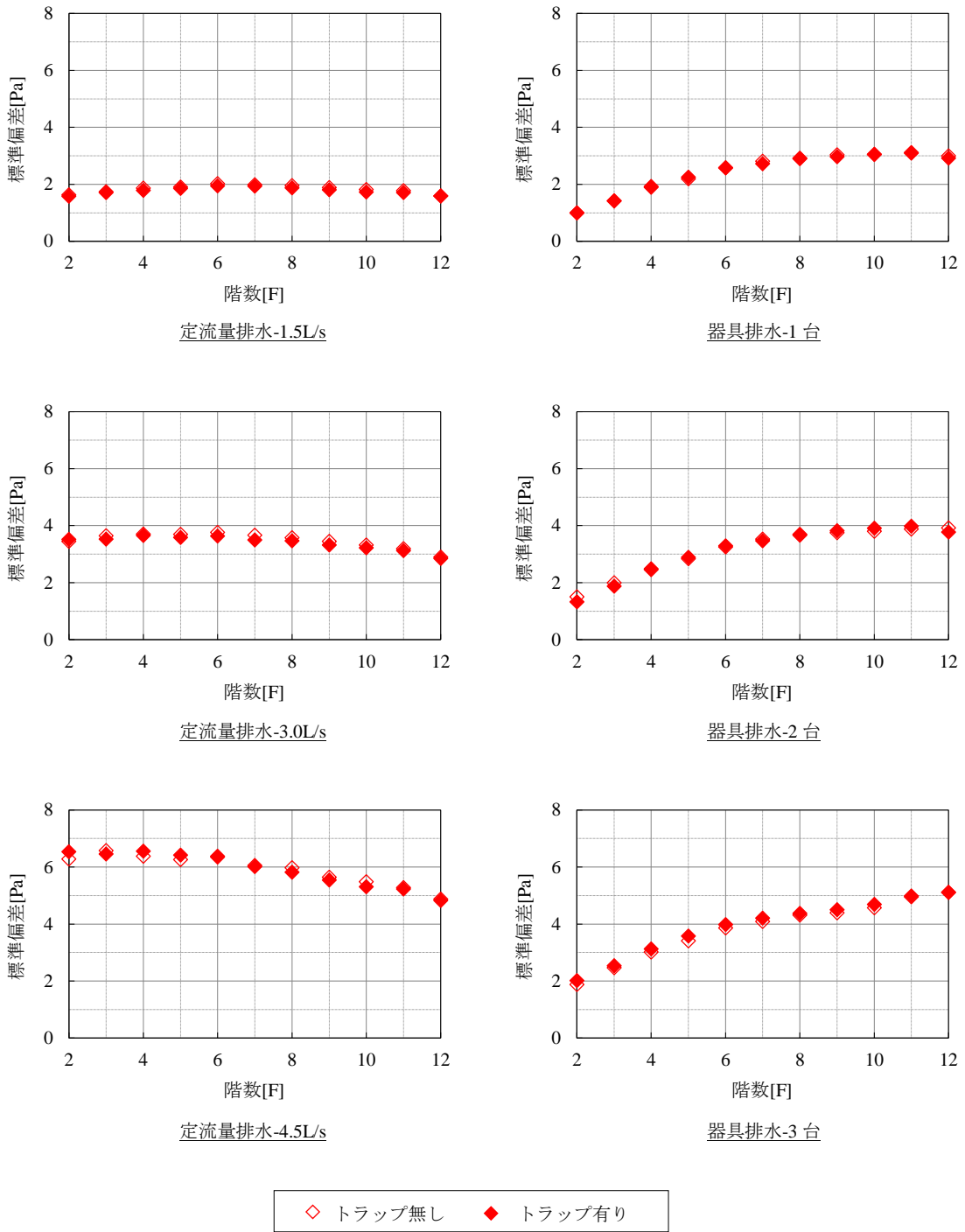


図 4.6-2 各排水負荷における管内圧力変動の標準偏差

表 4.6-1 各排水負荷の標準偏差の低減率[-]

階数[F]	負荷方法					
	定流量排水			器具排水		
	1.5L/s	3.0L/s	4.5L/s	1台	2台	3台
12	1.00	0.98	0.99	0.97	0.96	1.00
11	0.96	0.98	0.99	1.00	1.02	1.01
10	0.95	0.97	0.97	1.00	1.03	1.02
9	0.96	0.96	0.98	0.98	1.02	1.03
8	0.96	0.97	0.97	0.99	1.01	1.01
7	0.97	0.95	0.99	0.97	0.98	1.03
6	0.96	0.97	1.00	1.01	1.01	1.03
5	0.98	0.97	1.02	1.03	1.02	1.05
4	0.96	0.99	1.03	0.99	1.01	1.04
3	0.99	0.97	0.98	0.99	0.94	1.03
2	0.97	1.02	1.04	0.99	0.88	1.07

※8階には逆わんトラップ、9階には大便器を設置

4.6.2 卓越振動数への影響

(1) 解析目的

定流量排水および器具排水における管内圧力変動のパワースペクトル解析を行い、卓越振動数の分布傾向を調べた。

(2) 解析方法

各負荷方法の 8 階と 9 階におけるトラップを接続した場合と接続していない場合の管内圧力変動にパワースペクトル解析を行い、パワースペクトル密度分布の比較を行った。スペクトルの処理条件は、3.3.3 と同様とした。また、図 4.6-3 のように、管内圧力変動および封水変動のパワースペクトル密度分布の最も卓越した山を第 1 卓越振動数とし、各実験における第 1 位卓越振動数の分布を調べた。対象とする振動数域は、1～5Hz とした。

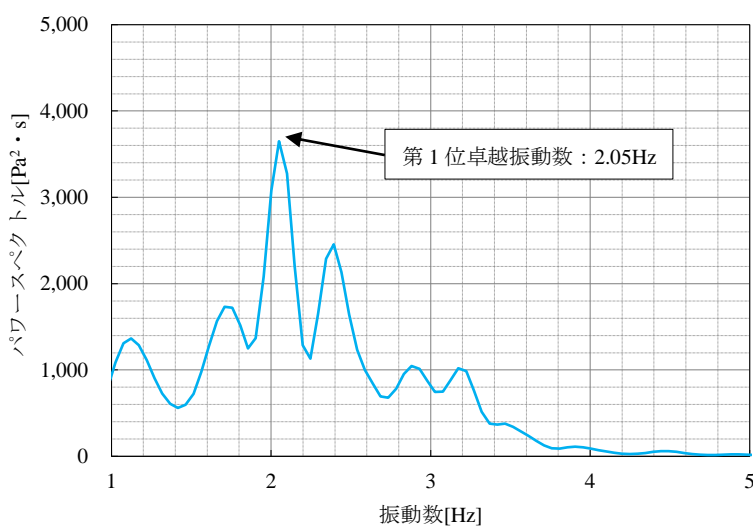


図 4.6-3 第 1 位卓越振動数の説明

(3) 解析結果

管内圧力変動のパワースペクトル密度分布図の一例を図 4.6-4 と図 4.6-5 に示す。

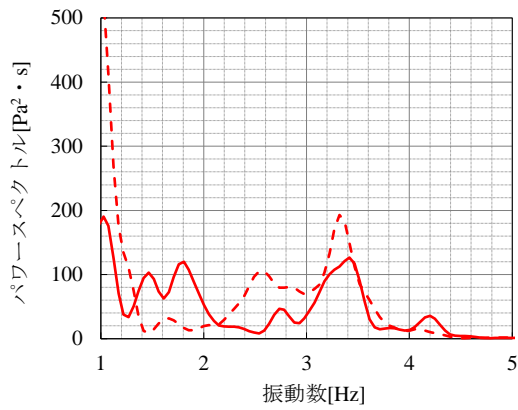
図 4.6-4 より、定流量排水におけるパワースペクトルには、トラップの有無による差がみられた。特に、2～3Hz の振動域において、トラップ無しの場合には山型となる傾向があるが、その一方で、トラップ有りの場合には同振動域で谷型となる傾向にあった。これは、3.3.3 の結果と同様に、設置したトラップの固有振動数が 2～3Hz に存在するため、管内圧力変動への応答が顕著に表れたものと考えられる。

図 4.6-5 より、器具排水におけるパワースペクトルでは、負荷器具数が 1 台の場合のみ、定流量排水のような傾向がみられたが、2 台、3 台の場合には、そのような傾向がみられなかった。大便器固有の管内圧力変動波形が原因と考えられる。

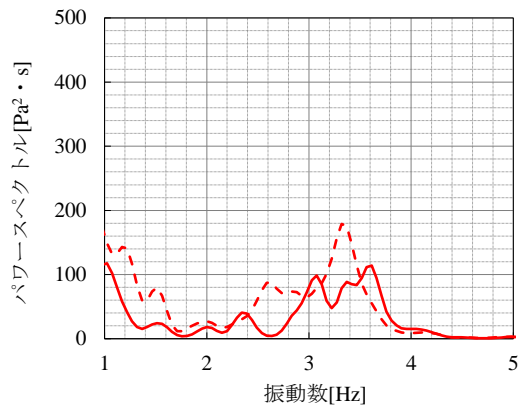
管内圧力変動および封水変動のパワースペクトル密度分布より、各実験の第 1 卓越振動数を図 4.6-6 にまとめた。定流量排水における 8 階の結果より、8 階に設置した逆わんトラップの封水変動の卓越振動数は 2～2.5Hz に分布しており、トラップの固有振動数がその範囲内にあると考えられる。また、定流量排水における 9 階の結果では、封水変動の卓越振動数は、ばらつく結果となった。9 階に設置した大便器における溜水面の変動は非常に複雑であるため、各実験による解析結果に差が出たと考えられる。

器具排水における結果では、トラップ有りの場合の卓越振動数が 2～3Hz の振動数域に出現することが少なかったため、トラップの有無が管内圧力変動の卓越振動数に及ぼす影響を確認することができなかった。器具排水の際に発生する管内圧力変動と定流量排水における管内圧力変動では、振動成分が異なることが考えられる。

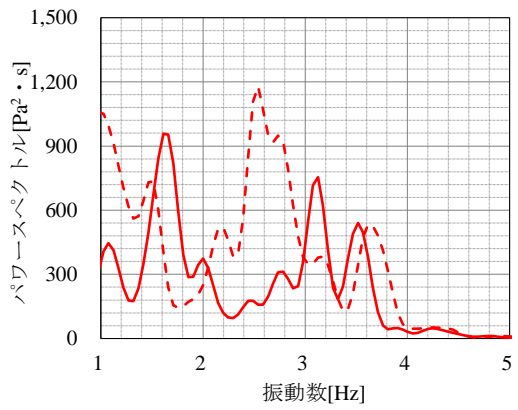
以上のことから、トラップの有無が管内圧力変動の卓越振動数に影響を及ぼすためには、設置するトラップ無しの場合で発生する管内圧力変動の卓越振動数と、設置するトラップの固有振動数が、概ね一致する必要があるといえる。



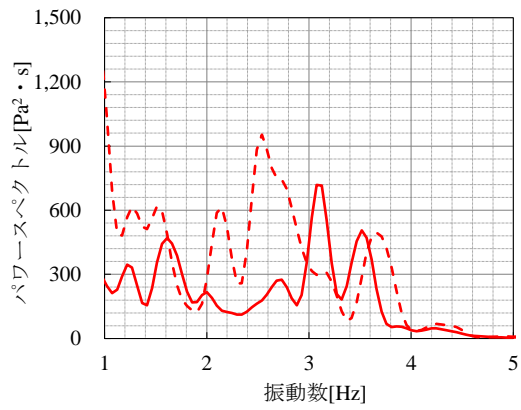
負荷流量 1.5L/s-8F



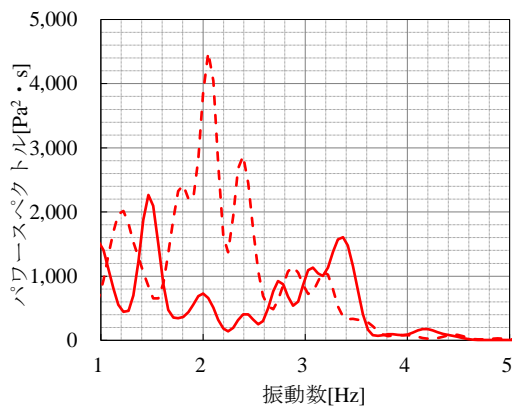
負荷流量 1.5L/s-9F



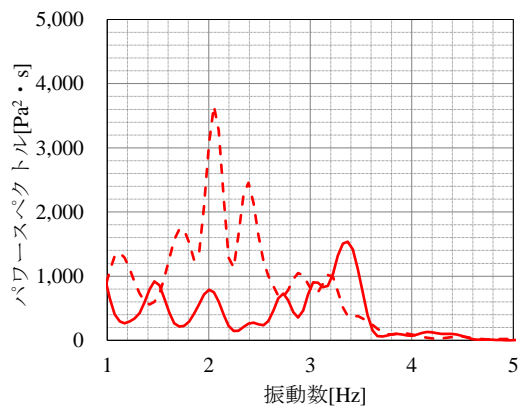
負荷流量 3.0L/s-8F



負荷流量 3.0L/s-9F



負荷流量 4.5L/s-8F



負荷流量 4.5L/s-9F

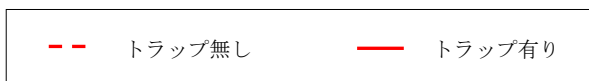
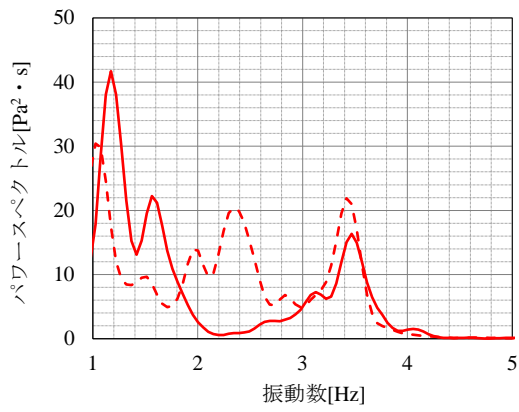
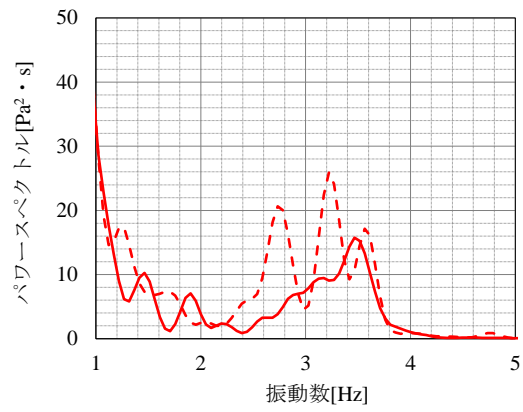


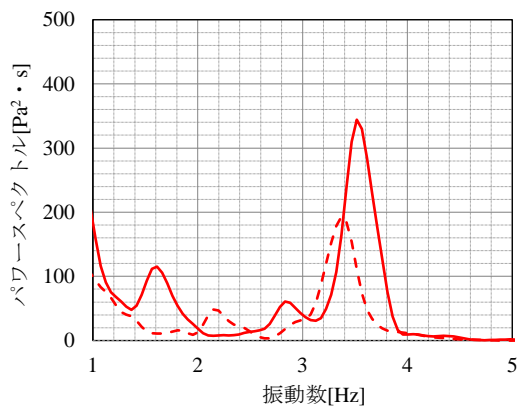
図 4.6-4 パワースペクトル密度分布の一例（定流量排水）



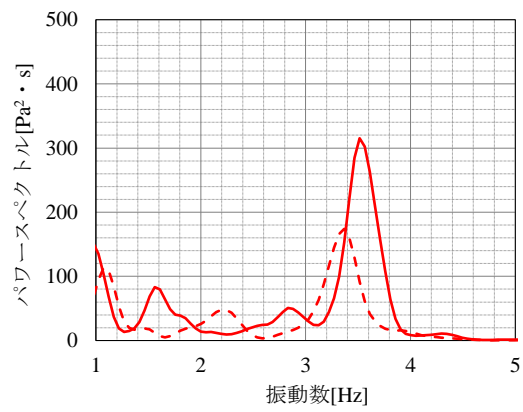
負荷器具数 1 台-8F



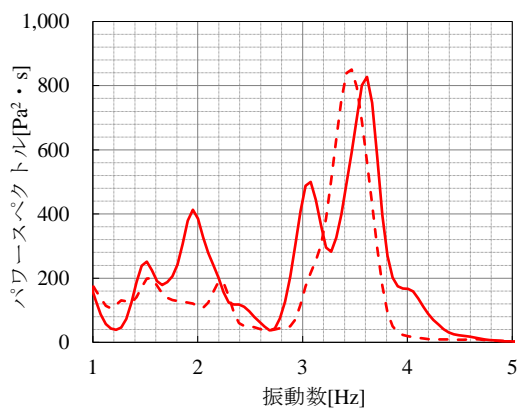
負荷器具数 1 台-9F



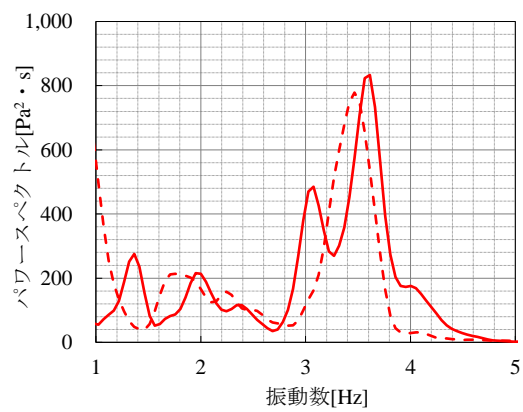
負荷器具数 2 台-8F



負荷器具数 2 台-9F



負荷器具数 3 台-8F



負荷器具数 3 台-9F



図 4.6-5 パワースペクトル密度分布の一例（器具排水）

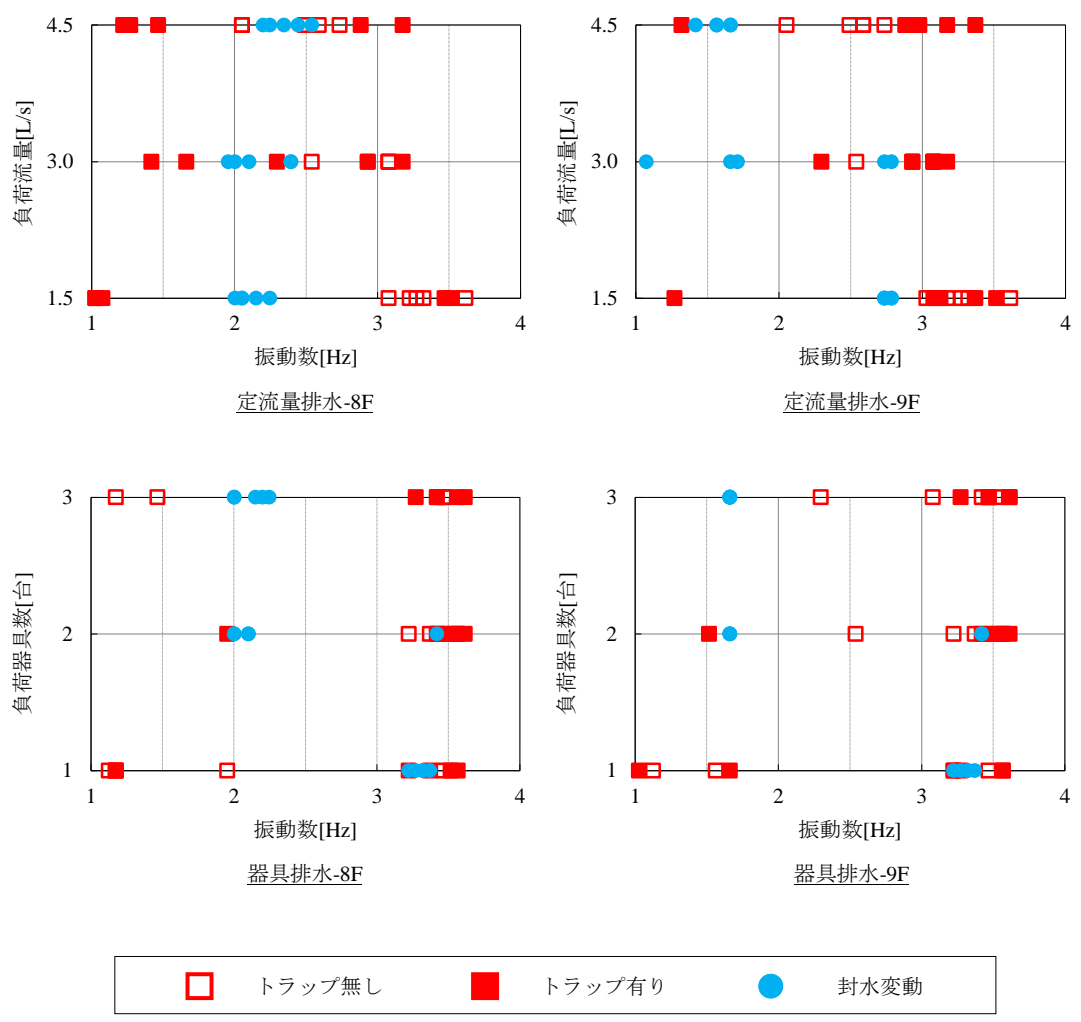


図 4.6-6 管内圧力変動と封水変動の卓越振動数分布

第 5 章

トラップ封水変動の挙動モデル

5.1 解析目的

排水システムの性能において、最も重要視されるべき事柄は破封の防止である。そのため、実験値を基にして、管内圧力変動と封水変動、封水損失との関係の解析を行うことで、システムにとって許容される圧力値の規定や封水損失の規定がなされている。しかしながら、4章までに記述している通り、管内圧力と封水は、トラップの種類や管内圧力のスペクトルなどの様々な条件により、その相関性に影響を及ぼすことが明らかとなった。更なる知見を得るためにはさらに数多くの実験を行っていく必要があるが、そのような数多くの条件における実験を行うためには、相当な時間・作業量が必要となる問題がある。それに対して、封水の挙動のモデル化を行うことができれば、それを解くことにより、様々な条件下における結果を簡便に得ることが可能となる。そこで、本章では、運動方程式を基にして、封水の挙動の数学モデルの作成を行い、実験値との比較を行った。

5.2 解析方法

2.3において述べたトラップ封水変動と運動方程式の基礎理論を基に、数学モデルの構築を行い、種々の実験によって得られた結果と解析値の比較を行った。

5.3 解析結果

5.3.1 同径トラップにおける封水振動の運動方程式

(1) 運動方程式

同型トラップにおいては、両脚断面積が同一であるので、変位（基準レベルからの水位）の2倍が水位差になる。この水位差分の封水の重量が復元力になる。したがって、式(2.3-1)の m は封水量×密度、 k は水位差 ($2y$) 分の封水量 × 密度 × 重力に置き換えられる。管径を D 、断面式を A ($=\pi D^2/4$)、封水長を L とし、重量の加速度を g とすると、 m 、 c 、 k はそれぞれ $m=\rho AL$ 、 $c=c$ 、 $k=2\rho Ag$ となり、式(2.3-1)は式(5.3-1)のように置き換えられる。

$$y = \rho AL \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + 2\rho Ag y = 0 \quad (5.3-1)$$

式(5.3-1)の一般解は式(5.3-2)になる。

$$y = Ge^{-\alpha t} \cos(\omega^* t - \delta) \quad (5.3-2)$$

ここに、 G : 初期条件から定まる積分定数

$$\alpha = \frac{c}{2m} = \frac{c}{2\rho AL}$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k-c}{m}} = \sqrt{\frac{2\rho Ag - c}{\rho AL}}$$

δ = 位相

(2) 供試トラップ

トラップ形状の一例として、図 5.3-1 に示すような S トラップ（透明）を対象とする。その形状パラメータを表 5.3-1 に示す。管径 D は 3cm とする。残留封水深は封水深の 1/2 の 3cm とすると、封水長 L は $3.0+(1.5+4+1.5)+3.0=13\text{cm}$ 、断面積 A は $\pi D^2/4=3.14 \times 3 \times 3 \cdot 4=28.3/4=7.07\text{cm}^2$ となる。

また、質量： $m=\rho AL=1 \times 7.07 \times 13=91.9\text{g}$ (0.0919kg)、ばね定数： $k=2\rho Ag=2 \times 1 \times 7.07 \times 980=13,900\text{g/s}^2$ (13.9N/m) となる。

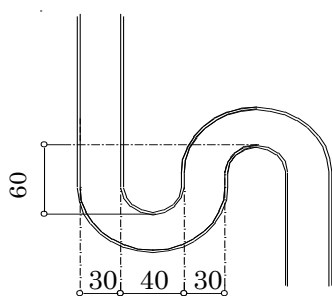


図 5.3-1 供試トラップの形状

表 5.3-1 供試トラップの形状パラメータ

トラップ種類	脚断面積比 [-]	口径 [mm]	脚断面積 [mm ²]	封水深 [mm]	封水長 [mm]	封水量 [mL]
S トラップ	1	30	707	60	130	368,000

(3) 減衰係数 c の決定

式(9)の減衰係数 c は式(2.3-3)で求められるが、減衰比 ζ は実自由振動実験の実測データ（波形）により求めることになる。

供試トラップに初期条件 (y_0) として初期水位 = 15cm を与えたときの自由振動の水位変動を図 5.3-2 に示す。

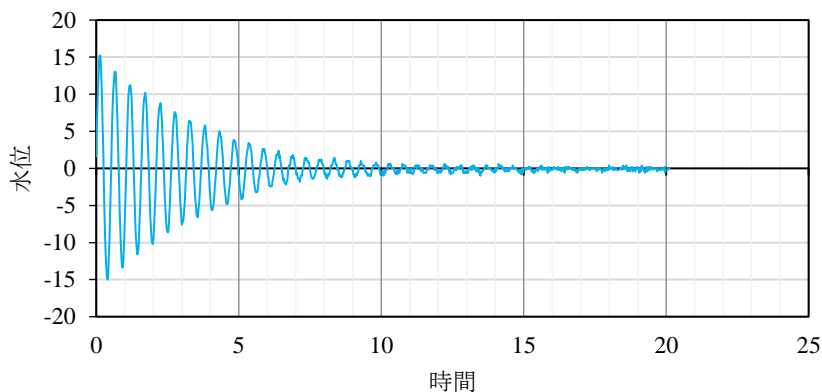


図 5.3-2 供試トラップの自由振動波形（実験値）

減衰自由振動波形の振幅は図 5.3-2 のように指数関数的に減衰する。隣り合う振幅の比の対数は一定値となり、隣り合う振幅の比の自然対数を対数減衰率 σ という。対数減衰率： σ は式(5.3-3)より求められる。

$$\sigma = \frac{\Sigma(\ln \frac{F_n}{F_{n+1}})}{n} \quad (5.3-3)$$

図 5.2-5 より振幅 $F_1 \sim F_9$ は式(5.3-4)になり、式(5.3-3)に代入すると、式(5.3-5)のようになる。

$$F_1 \sim F_9 = 15.2, 13.0, 11.2, 10.2, 8.6, 7.6, 6.4, 5.8, 5.0[\text{mm}] \quad (5.3-4)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\ln \frac{15.2}{13.0} + \ln \frac{13.0}{11.2} + \ln \frac{11.2}{10.2} + \ln \frac{10.2}{8.6} + \ln \frac{8.6}{7.6} + \ln \frac{7.6}{6.4} + \ln \frac{6.4}{5.8} + \ln \frac{5.8}{5.0}}{9} \\ &= \frac{0.157 + 0.148 + 0.0953 + 0.174 + 0.122 + 0.174 + 0.0953 + 0.148}{9} \\ &= 0.124 \end{aligned} \quad (5.3-5)$$

減衰比： ζ は対数減衰率： σ を用いて式(5.3-6)より得られる。

$$\zeta = \frac{\sigma}{2\pi} = \frac{0.124}{2 \times 3.14} = 0.0197 \quad (5.3-6)$$

臨界減衰係数 c_c は式(2.3-3)のように求められるので、これを式(2.3-5)へ代入すると、減衰係数 c は式(5.3-8)で求められる。

$$c_c = 2\sqrt{mk} = 2\sqrt{91.9 \times 13,900} = 2\sqrt{1,280,000} = 2 \times 1,130 = 2,260 \quad (5.3-7)$$

$$c = \zeta c_c = 0.0197 \times 2,260 = 44.5 \quad (5.3-8)$$

(4) 自由振動波形

$m=91.9$ 、 $c=50.2$ 、 $k=13,900$ であるので、式(5.3-2)の α 、 ω^* はそれぞれ式(5.3-9)、式(5.3-10) になるので、式(5.3-2)は式(5.3-11)となる。

$$\alpha = \frac{c}{2m} = \frac{44.5}{2 \times 91.9} = 0.242 \quad (5.3-9)$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{k-c}{m}} = \sqrt{\frac{13,900-44.5}{91.9}} = \sqrt{151} = 12.3 \quad (5.3-10)$$

$$y = Ge^{-0.242t} \cos(12.3t - \delta) \quad (5.3-11)$$

初期変位（水位）を 15cm として $G=15$ 、位相： $\delta=0$ とすると、式(5.3-11)は式(5.3-12)として表すことができる。

$$y = 1.5e^{-0.242t} \cos 12.3t \quad (5.3-12)$$

式 (5.3-12) を用いて描いたトラップ封水の自由振動波形は図 5.2-6 のようになる。両図はほぼ一致していることみなすことができ、式 (5.3-12) の精度は高いと判断できる。

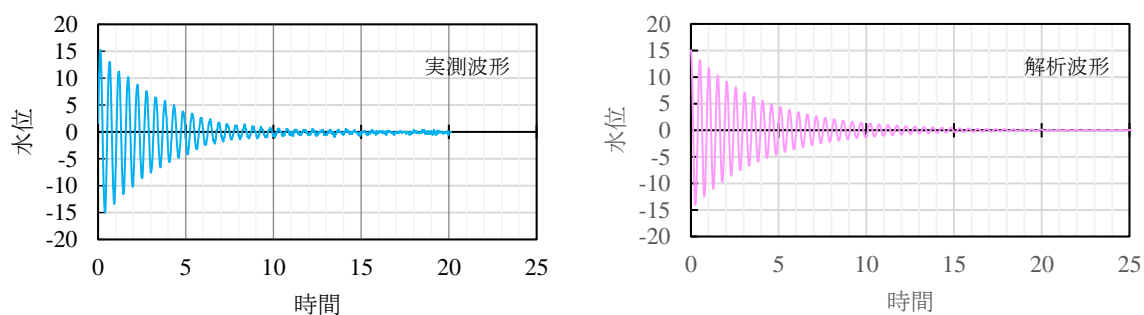


図 5.3-3 同径トラップにおける自由振動の実測値と計算値

(5) 固有振動数

固有角振動数： $\omega_0 = \omega^*$ とすると、固有振動数 f_0 は、固有角振動数は式(2.3-6)で求められるので、式(2.3-6)と式(2.3-8)を用いて式(5.3-13)と式(5.3-14)より、1.96Hz が求められる。また、固有周期 T_0 は式(5.3-15)より 0.51s となる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{13,900}{91.9}} = \sqrt{151} = 12.3 \quad (5.3-13)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{12.3}{2 \times 3.14} = \frac{12.3}{6.28} = 1.96 \quad (5.3-14)$$

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{1.96} = 0.51 \quad (5.3-15)$$

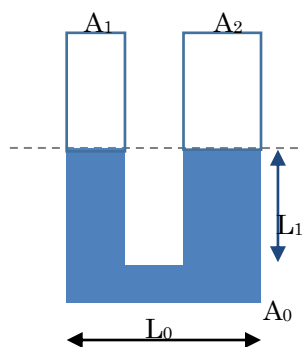
5.3.2 異径トラップにおける封水振動の運動方程式

(1) 運動方程式

異径トラップの場合は、両脚の断面積が異なるので、変位（水位）による水位差は変位の2倍にはならない。トラップを流入脚、通水路、流出脚の3部に単純化し、それぞれの長さを L_0 、 L_1 、 $L_2 (=L_1)$ 、断面積を A_0 、 A_1 、 A_2 とする（図 5.3-4）。流入脚に変位（水位） y があるとき、流入脚の変位（水位）は $-\left(\frac{A_1}{A_2}\right)y$ となるので（図 5.3-4）、水位差 Δy は式(5.3-16)

で表される。

$$\Delta y = \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right)y \quad (5.3-16)$$



L_0 : 通水路長 [cm]
L_1 : 流入脚長 [cm]
A_0 : 通水路の断面積 [cm ²]
A_1 : 流入脚の断面積 [cm ²]
A_0 : 流出脚の断面積 [cm ²]

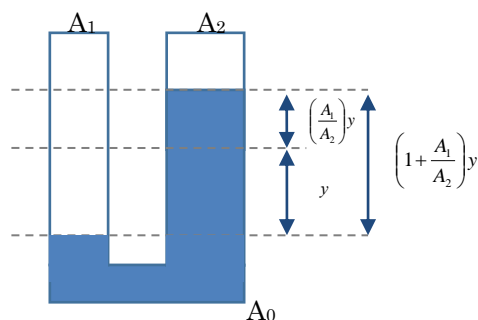


図 5.3-4 異径トラップの形状モデル

図 5.2-8 異径トラップ変位（水位）

また、面積 A は流入脚と流出脚の断面積の平均によるものとする、 $\left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right)$ として表されるので、式(2.3-1)の m 、 c 、 k はそれぞれ $m = \rho(A_0 L_0 + (A_1 + A_2)L_1)$ 、 $c = c$ 、

$k = \rho \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) g$ となり、式(2.3-1)は式(5.3-17)のように置き換えられる。

$$\rho(A_0L_0 + (A_1 + A_2)L_1) \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + \rho \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) gy = 0 \quad (5.3-17)$$

なお、式(5.3-17)において、 $A_0=A_1=A_2=A$ 、 $L_0+2L_1=L$ とすると同径トラップとなる。この場合は、式(5.3-18)のようになり、これは式(5.3-1)と同じになる。すなわち、式(5.3-17)は同径、異径のいずれにも適用できる。

$$y = \rho AL \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + 2\rho Agy = 0 \quad (5.3-18)$$

式(5.3-17)の解は式(5.3-19)になる。

$$y = Ge^{-\alpha t} \cos(\omega^* t - \delta) \quad (5.3-19)$$

ここに、 G : 初期条件から定まる積分定数

$$\alpha = -\frac{c}{2m} = \frac{c}{2\rho(A_0L_0 + (A_1 + A_2)L_1)}$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k-c}{m}} = \sqrt{\frac{\rho \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) g - c}{m}}$$

(2) 自由振動の運動方程式

トラップ形状モデル例として、管トラップを想定し、 $L_0=7.0$ 、 $L_1=L_2=3.0$ [cm]とする。
 $D_0 = D_1 = 3.0$ [cm]、 $D_2 = 4.0$ [cm] とすると、 $A_0 = A_1 = \frac{D_0^2 \pi}{4} = 7.07$ [cm²]、
 $A_2 = \frac{D_2^2 \pi}{4} = 12.6$ [cm²]となる。なお、 $\frac{A_1 + A_2}{2} = \frac{19.7}{2} = 9.84$ [cm²]、 $\frac{A_1}{A_2} = 0.561$ である。よって、 m [g]と k [g/s²]は、それぞれ式(5.3-20)、式(5.3-21)となる。

$$m = \rho(A_0L_0 + (A_1 + A_2)L_1) = 1 \times (7.07 \times 7.0 + 19.7 \times 3.0) = 109 \quad (5.3-20)$$

$$k = \rho \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) g = 1 \times \left(1 + \frac{7.07}{12.6}\right) \times 9.84 \times 980 = (1 + 5.61) \times 9.84 \times 980 = 15,000 \quad (5.3-21)$$

減衰傾向は同型トラップと同様であるとする、減衰係比 $\zeta=0.0197$ となり、臨界減衰係数 $c_c = 2\sqrt{mk} = 2\sqrt{109 \times 15,000} = 2\sqrt{1,640,000} = 2 \times 1,280 = 2,560$ であるので、減衰係数 $c = \zeta c_c = 0.0197 \times 2,560 = 50.4$ となる。これらより、式(5.3-18)は式(5.3-22)となる。

$$109 \frac{dy^2}{dt^2} + 50.4 \frac{dy}{dt} + 15,000y = 0 \quad (5.3-22)$$

よって、 α 、 ω^* は、式(5.3-23)、式(5.3-24)となり、初期変位（水位）を 15cm として $G=15$ 、位相： $\delta=0$ とすると、式(5.3-19)は式(34)となる。また、式(5.3-25)による解析波形を図 5.2-9 に示す。

$$\alpha = \frac{c}{2m} = \frac{50.4}{2 \times 109} = 0.23 \quad (5.3-23)$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} = \sqrt{\frac{k-c}{m}} = \sqrt{\frac{15,000 - 50.4}{109}} = \sqrt{138} = 11.7 \quad (5.3-24)$$

$$y = 15e^{-0.23t} \cos 11.7t \quad (5.3-25)$$

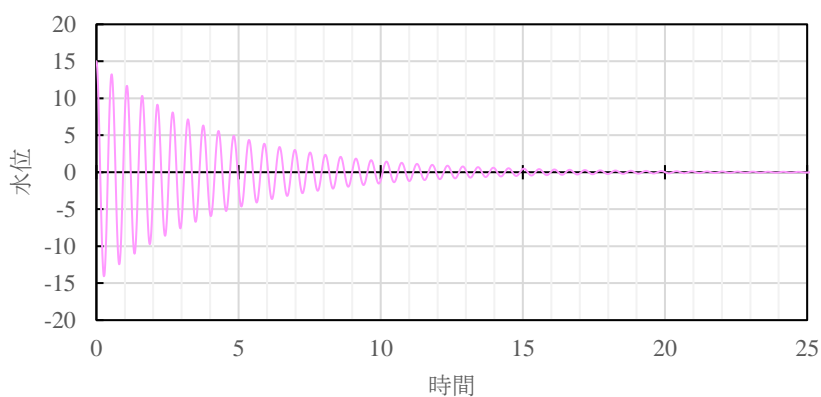


図 5.2-9 異径トラップにおける解析波形

(3) 強制振動の運動方程式

トラップ封水の変動現象は、は管内圧力変動によって変動する強制振動現象である。管内圧力 P の単位[Pa]は S 単位系なので、cgs 単位系に変換すると、次になる。

$$[Pa] = [N/m] = [kg \cdot m/s^2 / m] = [kg/s^2] = [1,000g/s^2] = 10^3 [g/s^2]$$

管内圧力 P を強制力とする強制振動の方程式は、式(5.3-17)を用いて式(5.3-26)のようになり、5.3 の諸係を用いて式(5.3-27)のように表される。

$$\begin{aligned} & \rho(A_0L_0 + (A_1 + A_2)L_1) \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + \rho \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) gy - A_2P \\ & = m \frac{dy^2}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + 2ky - A_2P = 0 \end{aligned} \quad (5.3-26)$$

$$109 \frac{dy^2}{dt^2} + 56.8 \frac{dy}{dt} + 15,000y - 12.6 \times 10^3 P = 0 \quad (5.3-27)$$

強制力が作用する場合の封水変動の挙動を式(36)を用いて計算するためには、流出脚の封水末端がトラップのウェアを超え、その一部が流出し、封水損失が生じる現象を考慮しなければならない。この場合は封水の質量が減ることになるので、非定常現象（過渡現象）として扱わなければならない。非定常現象の一般解は得られないので、数値的に解くために、数値解析法を適用する必要がある。数値解析法として、本論ではプログラミング言語にはVBA(Visual Basic for Application)を用い、ルンゲ・クッタ法を適用した。

式(5.3-27)は2階の常微分方程式であるので、ルンゲ・クッタ法では微増分を2つの方程式を連立して解くことになる。よって、式(5.3-27)より式(5.3-28)が得られる。

$$\frac{dy}{dt} = v \quad \frac{dv}{dt} = \frac{12,600}{109}P - \frac{56.8}{109}v - \frac{15,000}{109} = 116P - 0.521v - 138y \quad (5.3-28)$$

式(5.3-28)の P の項に実大排水実験タワーにおいて測定した実管内圧力を適用して、数値解析を行った。解析に用いた実管内圧力の波形と、それに対応した実際の封水変動、および数値解析の結果を図 5.2-10 に示す。トラップの封水変動は実管内圧力に応答している波形となっていた。それに対して、数値解析結果も管内圧力変動に対して応答した波形となることが確認できた。ただし、数値解析上は、トラップの封水損失が時々刻々と発生し、それに応じて m の値が変化する現象を数値解析モデルへ反映させるが、実際にはもどり水が発生し、封水がウェアを上回った分の質量がすべてが損失するわけではないので、このウェアを上回った分の質量に対して補正係数を適用している。この補正係数の設定により、封水損失が決定されることになるので、今後はこの補正係数の精査が必要となる。

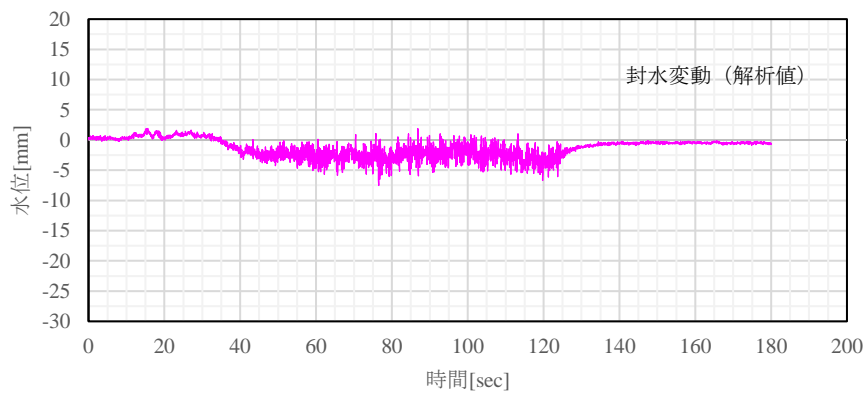
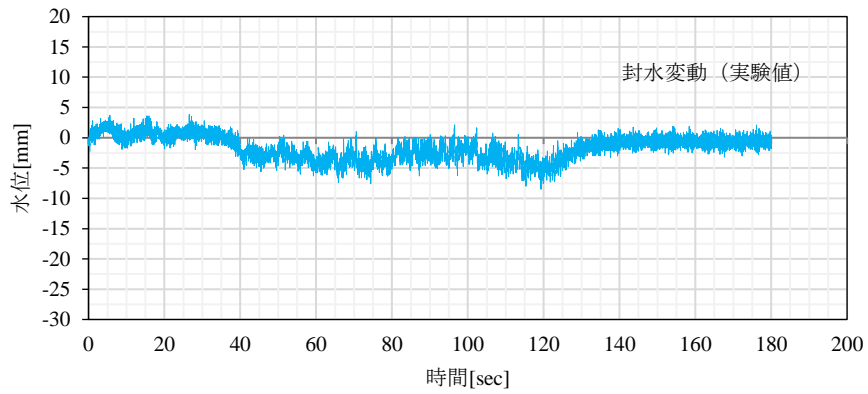
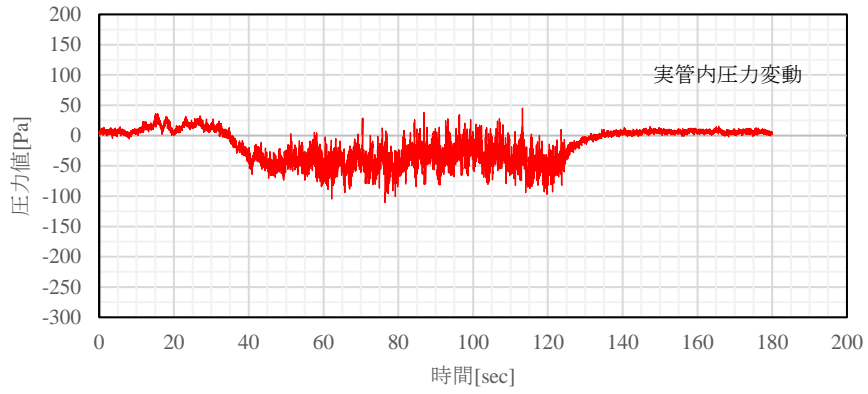


図 5.2-10 実測値と解析値の比較 (定流量排水 1.5L/s)

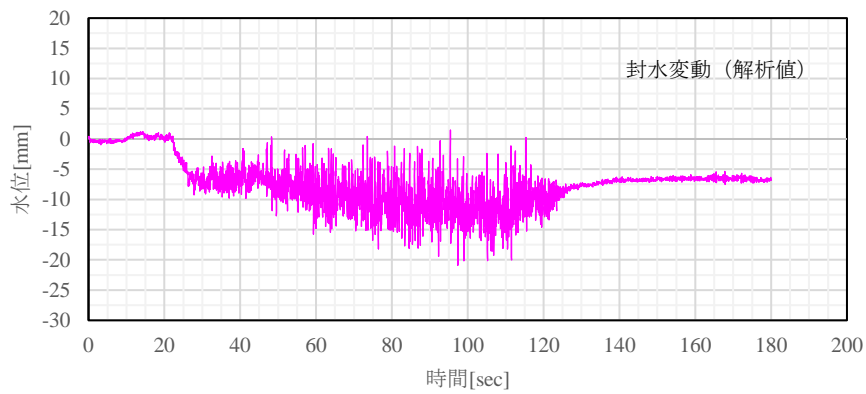
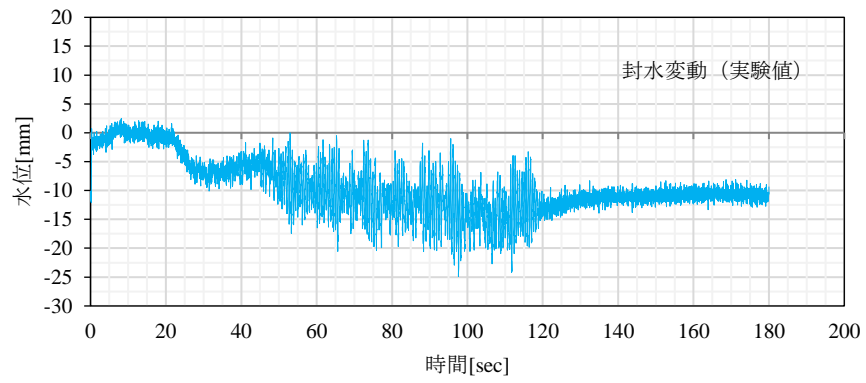
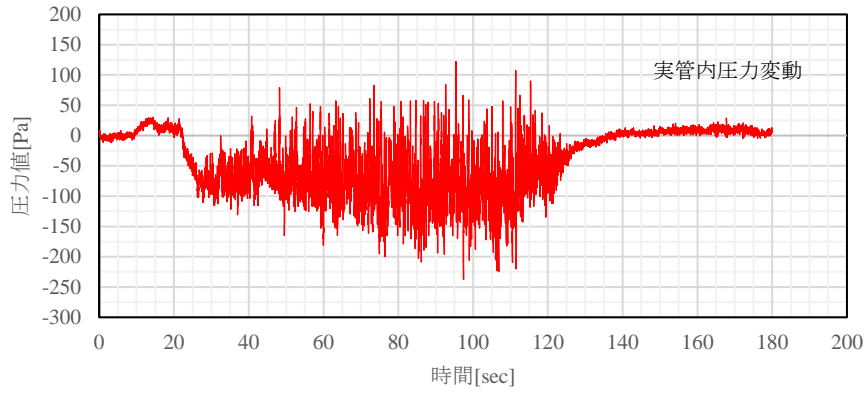


図 5.2-11 実測値と解析値の比較（定流量排水 4.5L/s）

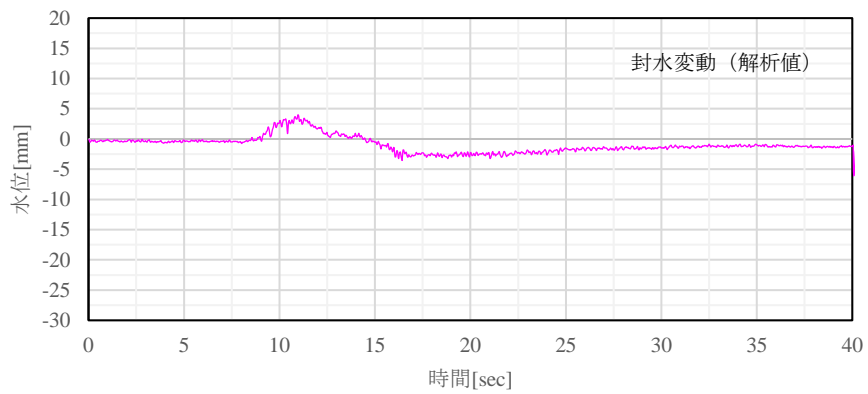
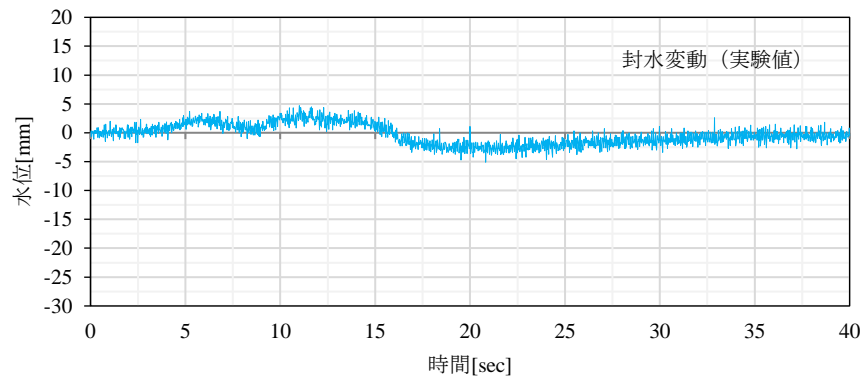
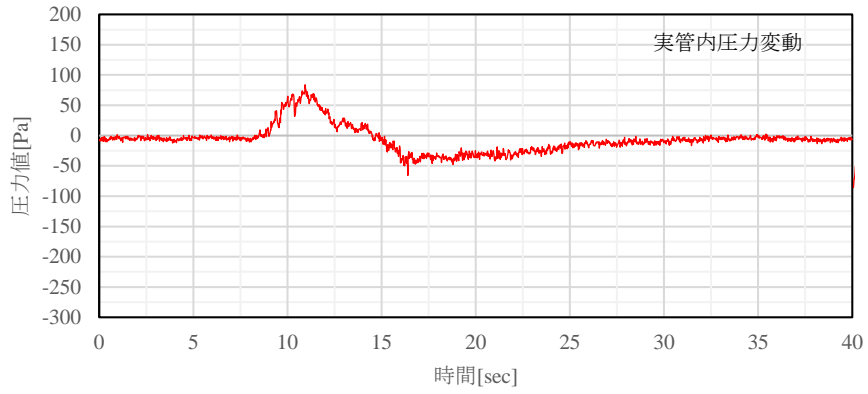


図 5.2-12 実測値と解析値の比較 (器具排水 1 台)

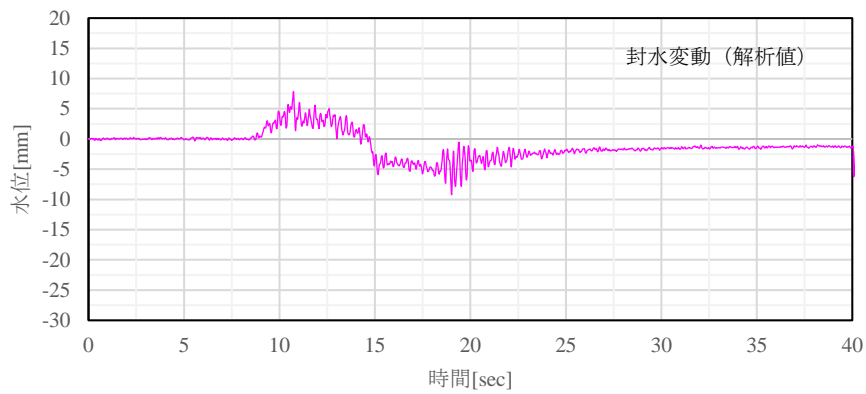
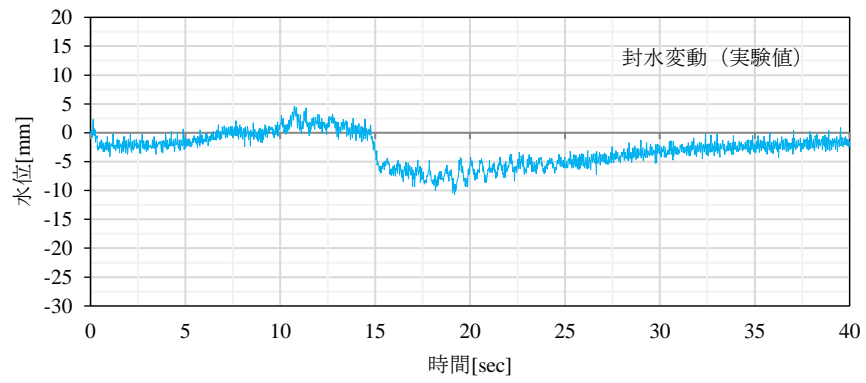
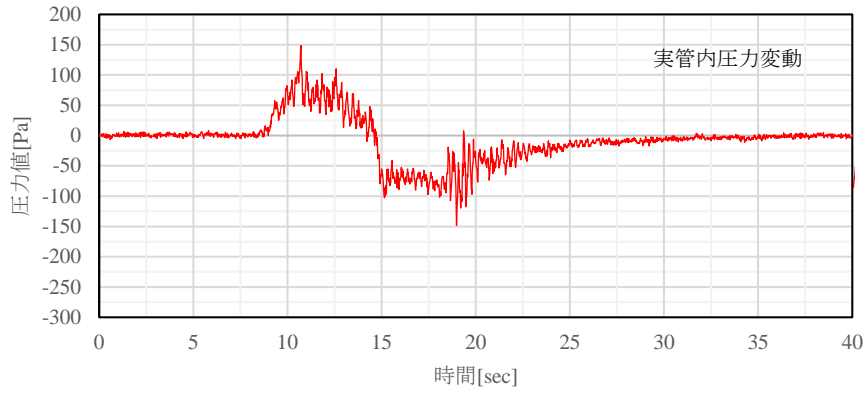


図 5.2-13 実測値と解析値の比較 (器具排水 3 台)

第 6 章

結論

6.1 本論文のまとめ

本論文において得られた知見を次にまとめる。

第3章 トラップの有無が管内圧力に及ぼす影響

本章では、トラップの封水が管内圧力変動に影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的として、形状の異なるトラップを実大排水タワー実験に用いて排水実験を行い、採取された管内圧力変動と封水変動のデータの解析を行った。得られた結果をまとめると、以下になる。

(1) 管内圧力への影響

隔壁トラップは管トラップと比較して管内圧力の減少傾向が顕著にみられたことから、隔壁トラップの方が管内圧力を低減させる作用が大きいと考えられる。

管内圧力変動の標準偏差を比較すると、封水量の多いトラップでは、標準偏差が小さくなる傾向が顕著に表れた。封水量の少ないトラップでは、明確な標準偏差の低減はみられなかったため、封水量が管内圧力の低減に影響を及ぼす要因のひとつとして考えられる。

システム最大・最小圧力値の低減率を比較すると、トラップを接続することによる低減率は、約0.85~0.95に推移しており、トラップの接続によってシステム最大・最小圧力値は約10%低減すると考えられる。また、管トラップと比較して隔壁トラップを接続した場合、低減傾向が大きかったことから、隔壁トラップは管トラップに比べ、システム最大・最少圧力値を低減させる作用が大きいと考えられる。

(2) 卓越振動数への影響

管内圧力変動をパワースペクトル解析した結果、卓越振動数の分布傾向はトラップによって大きく異なる結果となった。トラップを接続していない場合の卓越振動数は、2~3Hzに分布しているのに対して、隔壁トラップを接続した場合は、2~3Hzの範囲が0に近い値となる傾向がみられた。一方、Pトラップでは、この傾向がみられなかったことから、実験で使用したトラップの固有振動数が管内圧力変動の卓越振動数の分布に影響していると考えられる。本実験で使用した隔壁トラップの固有振動数が、2~3Hzに分布している一方で、Pトラップの固有振動数は1~2Hzであった。トラップを接続していない場合（自然状態）の管内圧力変動では2~3Hzの振動成分が多いため、振動域が一致する隔壁トラップを接続した場合に応答現象が大きく現れたと考えられる。

しかし、本実験で使用したSトラップの固有振動数は2~3Hzに分布するが、隔壁トラップと同様の傾向がみられなかった。このため、卓越振動数へ影響を及ぼす要因には、トラップの固有振動数と封水量が考えられる。

(3) トラップ設置条件による影響

管内圧力変動の標準偏差を比較すると、S トラップを除いたすべてのトラップにおいて、トラップなしの場合と比較して標準偏差が低減する傾向がシステム全体でみられた。同様のトラップにおいて 1 階における設置個数を変化させると、設置個数の多い場合の方がシステム全体で標準偏差の低減が大きくみられた。これより、トラップ封水量は管内圧力変動に影響し、トラップの接続階付近で管内圧力を低減させる作用があると考えられる。

パワースペクトル解析において、隔壁トラップでは、2~3Hz の振動数域でパワースペクトルが 0 に近い値となる傾向がみられた。特に 1 階に設置するトラップの個数が多い場合に、単独接続した場合と比較して、0 となる振動域が広くあらわれた。これは、トラップの固有振動数および封水量が影響していると考えられる。また、隔壁トラップ設置階の前後階におけるパワースペクトル密度分布を調べると、トラップ設置階と同様の傾向がみられた。このことから、トラップの接続が管内圧力変動の卓越振動数に与える影響は、トラップ設置階以外にも及ぶと考えられる。

大便器は封水量が大きく、固有振動数が 2~3Hz に分布しているが、管内圧力変動の卓越振動数の分布傾向に変化がなかった。このことから、トラップの封水量および固有振動数のみでなく、トラップ自体の形状も管内圧力変動の卓越振動数に影響を及ぼしていると考えられる。これより、接続対象のトラップが有する管内圧力変動に影響を及ぼす要因には、封水量（多い場合、影響が大きい）、固有振動数（2~3Hz に分布している場合）、形状（特に隔壁トラップである場合）が挙げられる。

なお、本実験で使用した大便器は一種類であり、既往の研究で管内圧力の低減がみられたものとは異なる。

第4章 排水負荷形態が管内圧力変動と封水変動に及ぼす影響

第4章では、排水システムにおける負荷形態が管内圧力変動に及ぼす影響について検討することを目的として、実大排水実験タワーにおいて SHASE-S 218 に基づいた定流量排水負荷と大便器による器具排水負荷を用いた排水実験を行い、採取された管内圧力変動と封水変動のデータの解析を行った。得られた結果をまとめると、以下になる。

(1) 管内圧力変動と封水変動

両排水負荷において、封水変動は圧力変動に応答した波形を示したが、その波形は負荷形態によって大きく異なった。封水変動に関しても定流量排水では、定常状態に達した際にはすでに封水が減少している状態であったが、器具排水では、排水が立て管を通過する直前と考えられる正圧発生時に、封水は管内圧力に応答して大きく振動し、その後、損失した。また、8階に設置した逆わんトラップの封水変動の方が、9階に設置した大便器のものと比較して振幅が大きくなっており、封水変動の標準偏差を比較すると、逆わんトラップは大便器の約2倍となっていた。供試トラップによって封水の変動幅が異なった原因として、トラップの構造や封水量が考えられる。

(2) 管内圧力への影響

定流量排水では、システム最大圧力値は最下階の2階、システム最小圧力値は10階または11階で発生していた。その一方で、器具排水では、下層になるに従って圧力最小値・最大値は減少する傾向にあった。定流量排水では、定常的に最上階層から排水が行われるのに対して、器具排水は大便器の洗浄によって一時的に排水が立て管内を通過するため、各階で発生する最大・最小圧力値の傾向が異なると考えられる。

各階の定流量排水と器具排水における負荷流量と最小圧力の関係を散布図で表し、その一次回帰式の決定係数 R^2 を求めると、決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに $0.64\sim 0.93$ と大きく、負荷流量と最小圧力には高い相関性があることが確認された。また、一次回帰式の回帰係数 a から、器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α を求めると、回帰係数比 α は $1.94\sim 2.68$ となったことから、負荷流量（器具平均排水流量）が同値の場合、定流量排水において発生する最小圧力値は、器具排水のおよそ2～2.5倍となることが予測できる。

また、負荷流量とシステム最小圧力値の関係における一次回帰式から、器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α を求めると、各階の回帰係数比と同様に、回帰係数比 α は $1.96\approx 2$ を示したことから、定流量排水において発生するシステム最小圧力値は、器具排水のおよそ2倍となることが予測できる。

(3) 最小圧力と封水損失の関係

定流量排水と器具排水において、8階と9階に設置した各トラップの封水損失を比較すると、定流量排水の封水損失の方が大きい傾向となった。また、定流量排水においては、9階に設置した大便器の方が封水損失は大きいものに対して、器具排水では、8階に設置した逆わんトラップの方が封水損失は大きくなった。このことから、排水負荷形態によって、トラップの耐圧力性能は異なることが考えられる。

各階の定流量排水と器具排水における最小圧力値と封水損失の関係を一次回帰式で表すと、決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに $0.64\sim 0.90$ と大きく、最小圧力と封水損失には高い相関性があることが確認できた。また、器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α は、逆わんトラップ (8階) で 1.32 、大便器 (9階) で 2.91 となった。このことから、同程度の最小圧力が発生した際、定流量排水における封水損失は、逆わんトラップの場合およそ 1.3 倍となり、大便器の場合およそ 3 倍となることが予測できる。最小圧力値と封水損失の回帰係数比には、供試トラップによって大きな差があったことから、明確な定義づけを行うことは難しいと考えられる。

(4) トラップの有無による影響

本実験では、両排水負荷において、トラップの有無による管内圧力の大きな変化はみられなかった。その原因として、定流量排水では負荷流量が小さかったこと、器具排水では圧力変動が発生する時間が短いこと、さらには、システムに設置したトラップが8階と9階のみであったことが考えられる。

定流量排水における管内圧力変動のパワースペクトル密度分布には、トラップの有無による差がみられた。特に、 $2\sim 3\text{Hz}$ の振動域において、トラップ無しの場合には山型となる傾向があるが、その一方で、トラップ有りの場合には同振動域で谷型となる傾向にあった。これは、3章の結果と同様に、設置したトラップの固有振動数が $2\sim 3\text{Hz}$ に存在するため、管内圧力変動への応答が顕著に表れたものと考えられる。器具排水におけるパワースペクトルでは、負荷器具数が1台の場合のみ、定流量排水のような傾向がみられたが、2台、3台の場合には、そのような傾向がみられなかった。大便器固有の管内圧力変動波形が原因と考えられる。

管内圧力変動および封水変動のパワースペクトル密度分布より、各実験の第1卓越振動数をまとめると、定流量排水における8階に設置した逆わんトラップの封水変動の卓越振動数は $2\sim 2.5\text{Hz}$ に分布していた。また、定流量排水における9階の結果では、封水変動の卓越振動数は、ばらつく結果となった。9階に設置した大便器における溜水面の変動は非常に複雑であるため、各実験による解析結果に差が出たと考えられる。器具排水では、トラップ有りの場合の卓越振動数が $2\sim 3\text{Hz}$ の振動数域に出現することが少なかったため、トラップの有無が管内圧力変動の卓越振動数に及ぼす影響を確認することができなかった。器具排水の際に発生する管内圧力変動と定流量排水における管内圧力変動では、振動成分が

異なることが考えられる。

以上のことから、トラップの有無が管内圧力変動の卓越振動数に影響を及ぼすためには、設置するトラップ無しの場合で発生する管内圧力変動の卓越振動数と、設置するトラップの固有振動数が、概ね一致する必要があるといえる。

第5章 トラップ封水変動の挙動モデル

第5章では供試トラップの封水変動を1自由度系の振動とみなし、封水の挙動モデルを作成し、タワー実験によって得られた封水変動の実測値との比較を行った。強制振動モデルにおける解析値と実測値はよく一致しており、本報において作成した強制振動モデルは高い精度でトラップの封水振動を再現できると考えられる。

6.2 今後の課題

本研究における今後の課題と展望を以下に示す。

第3章 トラップの有無が管内圧力に及ぼす影響

既往の研究では、大便器を設置した際、管内圧力の低減がみられたが、本研究では供試トラップによって傾向は異なり、本実験で使用した大便器では管内圧力の低減およびパワースペクトル密度分布の傾向に変化がみられなかった。そのため、供試トラップに用いる便器の種類を増やし、管内圧力に影響を与えやすい便器の形状を検討することが課題に挙げられる。また、同型のトラップを対象に設置階および設置数のパターンを可変させた実験を行うことで、システム全体のトラップ設置個数に対する低減率が求まると考えられる。

第4章 排水負荷形態が管内圧力変動と封水変動に及ぼす影響

本実験では、システム途中階に設置した供試トラップの封水損失の優劣関係が、負荷形態によって異なることが確認された。そのため、代表的なトラップ（管トラップ、隔壁トラップ）を対象に両負荷形態による排水実験を行い、封水強度の優劣関係を調べる必要があると考えられる。

第5章 トラップ封水変動の挙動モデル

本研究では、封水振動を高い精度で再現可能な数学モデルを構築することができた。今後は、モデルの精度を高めるために、解析値と実測値のより詳細な比較・検討が必要となる。

参考文献

- 1) 塚越信行ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その1）、トラップ性能試験装置の開発（1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.473-474、1997.9
- 2) 坂上恭介ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その2）、トラップ性能試験装置の開発（2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.475-476、1997.9
- 3) 岩間誠ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その3）、トラップ性能試験装置の特性（1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.527-528、1998.9
- 4) 王耀輝ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その4）、トラップ性能試験装置の特性（2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.529-530、1998.9
- 5) 正久裕之ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その5）、各種トラップの基本動特性（1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.531-532、1998.9
- 6) 岩間誠ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その6）、各種トラップの基本動特性（2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.557-558、1999.9
- 7) 王耀輝ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その7）、各種トラップ封水の耐管内圧力性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、1999.9
- 8) 黒田晃正ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その8）、試験装置の再現性に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.577-578、2000.9
- 9) 正久裕之ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その9）、トラップの許容圧力に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000.9
- 10) 森山員征ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その10）、管内圧力変動の相関に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.531-532、2001.9
- 11) 王耀輝ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その11）、モデルトラップを用いた封水変動特性と戻り水に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.533-534、2001.9
- 12) 張月ほか：トラップ性能試験評価法に関する研究（その12）、合成波による評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.583-584、2004.8
- 13) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その1）、正圧時の封水損失特性、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1081-1084、2002.9
- 14) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その2）、耐圧力性能に関する基礎的検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.793-796、2003.9
- 15) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その3）、バリアフリー用ユニットバスの床排水トラップ、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1491-1494、2004.9
- 16) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その4）、排水実験タワーおよびトラップの性能装置を用いた実験、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.733-736、2005.8
- 17) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その5）、負圧側試験用圧力波の作成に関する基礎的な検討（1）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.773-776、2006.9
- 18) 光永威彦ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その6）、簡易型試験装置の特性と固

- 有振動数の決定法、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp769-772、2006.9
- 19) 張月ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その7）、負圧側試験用圧力波の作成に関する基礎的な検討（2）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp759-762、2007.9
 - 20) 栗山華ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その8）、単・3 正弦波による評価法の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp763-766、2007.9
 - 21) 郷栄治ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その9）、試験用圧力波を用いた封水損失の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp785-788、2008.9
 - 22) 柳澤義己ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その10）、各種トラップおよび実管内圧力の振動特性に関する検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp789-792、2008.8
 - 23) 栗山華ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その11）、簡易型圧力発生装置を用いた試験法の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp793-796、2008.8
 - 24) 栗山華ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その12）、単正弦波による簡易試験法の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp731-734、2009.9
 - 25) 郷栄治ほか：排水トラップの性能試験法に関する研究（その13）、脚断面積比が耐圧力性能に及ぼす影響に関する基礎的検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp735-738、2009.9
 - 26) 郷栄治ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その14）、簡易試験法および超節水型便器の耐圧力性能に関する検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 pp803-806、2010.9
 - 27) 森村玄ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その15）、簡易試験法における封水判定条件の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp819-822、2011.9
 - 28) 藤村和也ほか：トラップの性能試験法に関する研究（その16）、管内圧力変動と封水変動との関係、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp811-814、2011.9
 - 29) 藤村和也ほか：実大排水タワー実験による実管内圧力と封水変動に関する研究—管内圧力変動がトラップの封水に及ぼす影響の解析—、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp1163-1166、2012
 - 30) 外山敬之ほか：超節水型大便器接続による排水立て管システムの管内圧力への影響に関する実験的研究（第2報）洗浄水量4.8L 便器での検討、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp795-798、2010

おわりに

本論文は、筆者が明治大学大学院 理工学研究科 博士後期課程に在籍していた 2015 年 4 月から 2016 年 2 月までの期間において、指導教官である坂上恭助教授の御指導のもとに行った研究を、博士論文としてまとめたものです。坂上先生には、研究の進め方から取りまとめにいたるまで、終始にわたり適切な御指導・御助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

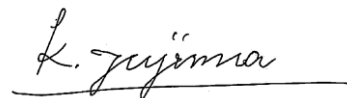
また、実大排水実験タワーにおける排水実験に際し、実験施設、および実験データの提供をして頂いた (株) クボタケミックスの八木 博史氏、並びに関係各位に対し、ここに感謝の意を表します。

また、坂上研究室の修士 2 年の栗栖祥太氏、修士 1 年の小嶋貴博氏、渡部晟也氏においては、論文作成を行う中で、膨大な量のデータ整理等を行って頂きました。最終的に何度も見返したくなるようなすばらしい内容に仕上げることができたのは、三人のおかげです。

そして、実際には先輩ではありますが、博士後期課程に同期として入学し、共に修了を迎える(株)山下設計の光永威彦氏、明治大学理工学部助手の呉光正氏には、苦楽を共にする仲間として大変お世話になりました。3 人で博士後期課程の修了を迎えられることを心の底から嬉しく思います。

大学生から博士前期課程修了まで、坂上研究室において研究を行ってきた期間は約 7 年となりますが、研究を通して多くの新しい体験や仲間に出会うことができ、それらは筆者にとってかけがえのない財産となりました。これからも、研究を通して、多くのことを学び、感じていきたいと思えます。末筆となりますが、本当に多くの皆様からご協力頂けたことに、心から感謝いたします。

2017 年 2 月

A handwritten signature in black ink, reading "K. Fujimura". The signature is written in a cursive style and is underlined with a horizontal line.

付録

Analysis of Influence of Connection of Traps on Pneumatic Pressure in Stack Pipe

K. Fujimura (1), K. Sakaue (2), T. Toyama (3)

1. kazuya.fujimura@mj-sekkei.com

2. sakaue@isc.meiji.ac.jp

3. t-toyama@kubota.co.jp

1. Mechanical Engineering Department, Mitsubishi Jisho Sekkei Inc., Japan

2. Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji University, Japan

3. Industrial Materials Manufacturing Dept., KUBOTA Co., Japan

Abstract

In the design of a drainage system, allowable drainage flow quantity (drainage capability) is defined for each pipe diameter in order to prevent seal water from breaking. In Japan, SHASE-S 218 (Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard) stipulates the evaluation standard for drainage capability. There are two types of test criteria in the standard: One specifies that pressure in pipe should fall within $\pm 400\text{Pa}$, and the other that seal loss should be less than 25 mm. Nevertheless, no detailed requirements for trap connection have been set forth in them, and nearly all judgments are made based on pneumatic pressure in pipe alone because of the ease of experimental procedures. However, there is a possibility that seal water fluctuation in traps has influence on pneumatic pressure vibration in drainage pipes.

In view of this, we conducted discharge experiments based on SHASE-S 218 with and without traps using a real size drainage experimental system to clarify how trap connection might influence pneumatic pressure.

Keywords

Drainage system, trap, induced siphonage, vibration reply phenomena, experiment

1. Introduction

In designing a drainage system in Japan, allowable drainage flow quantity (drainage capability) is defined for each pipe diameter in order to prevent seal water from breaking (SHASE-S 206). Targeting at induced siphonic effects, drainage capability of stack pipe is determined based on allowable seal loss or allowable pressure in drains. It is stipulated that allowable seal loss should be 25 mm, a half of the minimum seal depth of traps, that allowable pressure in drains $\pm 400\text{Pa}$, and that water fill ratio (the ratio of the discharge section area to the pipe cross-sectional area) 0.2 ~ 0.3 (varies depending on the type of ventilation) when circular flow is produced in stack pipe. SHASE-S 218, Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard, stipulates the drainage capability test method with allowable pressure in drains and allowable seal loss as the main test criteria. However, as the measurement of seal loss involves some cumbersome steps such as replenishment of seal water and judgment of instantaneous seal break, pressure in drains is normally measured without connecting traps but with PVC caps attached to the ends of horizontal drainage branches, and judgment is made based on allowable pressure in drains alone.

However, fluctuation in traps is considered a response phenomenon to pressure vibrations in drains, and it is conceivable that they interact with each other. In addition, considering the fact that traps are always installed in actual drainage systems, testing the capability of a drainage system without traps can hardly produce results that adequately predict the system's capability.

In view of this, we conducted discharge experiments based on SHASE-S 218 with and without traps to clarify how the presence or absence of traps might influence pressure in drains

2. Outline of Real-scale Drainage Tower Experiment

2.1 Purpose

We conducted experiments to obtain data on pressure fluctuation in horizontal drainage branches on each floor and seal water fluctuation / residual seal depth in each type of test trap when steady discharge load based on SHASE-S218 was applied.

2.2 Experimental drainage system

The outline of the experimental drainage system is shown in Figure 1 and schematics of the end sections of horizontal drainage branches in Figure 2. We prepared two types of experimental drainage system; one using special drainage fittings for mid-to-high-rise buildings up to 15-story (referred to as SDF-SL system below), and the other using special drainage fittings for super-high-rise buildings (referred to as SDL-HF system). Drainage capabilities of test fittings on each floor are shown in Table 1. Experiments were conducted using these systems both with and without traps.

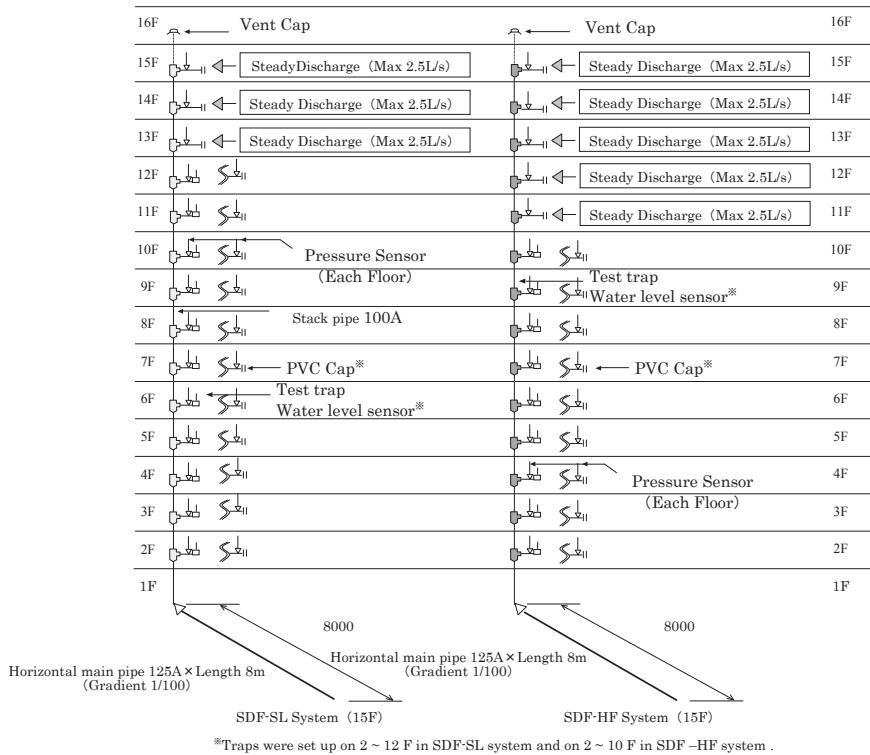


Figure 1 Outline of experimental drainage system

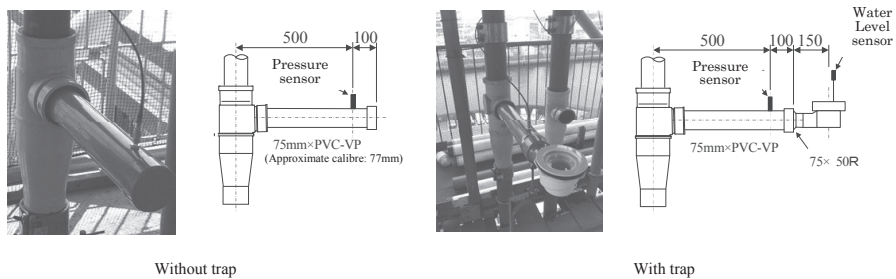


Figure 2 End sections of horizontal drainage branches

Table 1 Drainage capability of special drainage fitting [L/s]

Type of special drainage fittings	Size of Drainage stack [F]					
	8	10	12	14	16	20
SL type	—	—	—	—	10.0	9.7
HF type	—	7.6	7.0	6.5	6.0	5.8

2.3 Method

In experiments with traps, test traps (contrary bell traps) shown in Figure 3 were set up full filled on floors 2 ~ 12 with SDF-SL system, and on floors 2 ~ 10 with SDF-HF system. The parameters of test traps are shown in Table 2. In experiments without traps, PVC caps were attached to the ends of horizontal drainage branches on the floors where discharge was not loaded. Discharge loads were applied at constant flow rates shown in Table 3 to the systems both with and without traps, and data on pressure fluctuation and seal water fluctuation were collected with the sampling cycle of 20 ms and without low-pass filters (referred to as LPF below). Measurements were made 5 times in each condition for 40 seconds after discharge flow became stable.

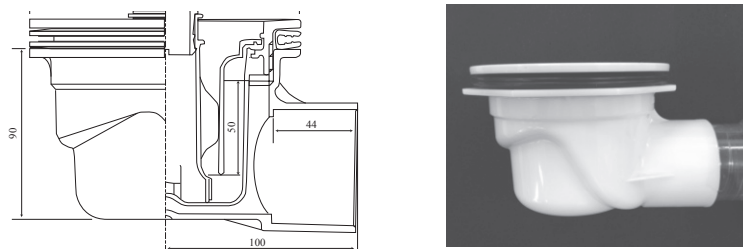


Figure 3 Outline of test trap

Table 2 Parameters of test traps

Test trap	Ratio of leg's sectional areas	Seal depth [mm]	Seal volume [mL]
Contrary bell trap	1.07	50	330

Table 3 Discharge flow conditions for each experimental drainage system

Experimental drainage systems	Steady discharge load [L/sec]									
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	10.0	12.0
SDF-SL System	○	○	○	○	○	○	○			
SDF-HF System			○		○			○	○	○

3. Comparison of Waveforms of Pressure Vibration in Drain

3.1 Purpose

Fluctuation of seal water in trap is considered a response phenomenon to pressure vibrations in drains, and it is conceivable that they interact with each other. In view of this, we compared waveforms of pressure vibrations in drain with traps and without traps to elucidate the effects of seal water fluctuation on pressure vibrations in drain.

3.2 Method

We compared the waveforms of pressure vibrations in drain by superimposing those with traps on top of those without traps for the same time periods. Standard deviation (SD) was obtained to compare quantitatively the changes in waveforms of pressure vibrations in drain with traps and without traps. However, normalized standard deviation (SD') obtained by dividing pressure vibration by discharge flow load was used for comparison since waveforms of pressure vibration tended to grow larger in proportion to discharge flow load.

3.3 Result

An example of graphic representation of superimposed pressure vibrations in drain is shown in Figure 4, and comparison of SD' with and without traps in Figure 5. Waveforms of pressure vibrations in drain did clearly show differences with and without traps. SD 's were more or less constant regardless of the floor from which data were collected, and they were larger without traps. Next, SD 's were averaged out and discharge flow loads on each floor were compared with or without traps. Comparison of SD 's with and without traps for each discharge flow load is shown in Figure 6, and the damping factor of SD 's due to connection of traps in Table 4. SD 's turned out to be larger without traps than with traps at all discharge flow loads in the both experimental drainage systems. This tendency of SD' was prominent when discharge flow load was large for the drainage capability of the system. In addition, the mean of SD 's damping factor was 0.88 for SDF-HF system, and 0.90 for SDF-SL system. Consequently, it can be estimated that waveforms of pressure vibrations in drain damp approximately 10% if traps are connected.

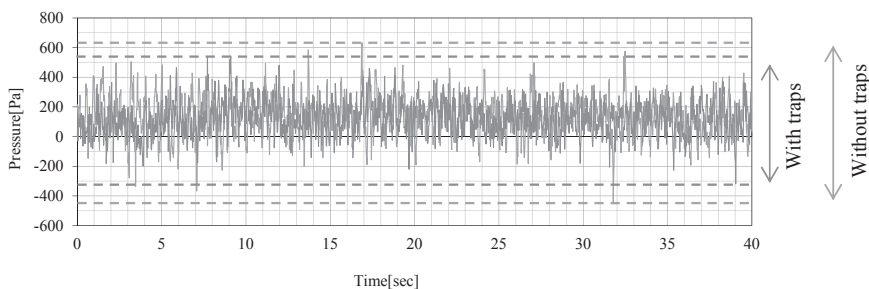


Figure 4 An example of superimposed waveforms of pressure vibrations in drain

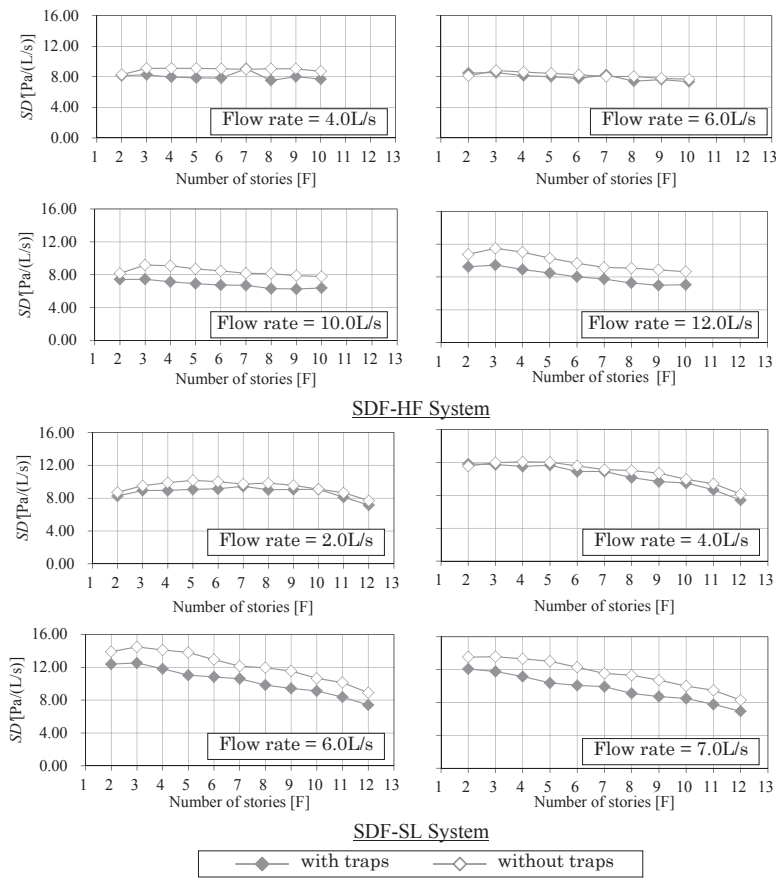


Figure 5 Comparison of SD' normalized with discharge flow load

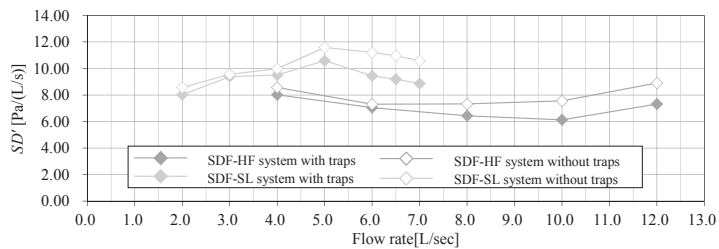


Figure 6 Comparison of normalized standard deviation SD' by flow rate

Table 4 Damping factor of normalized standard deviation SD'

Drainage system	Flow rate [L/sec]	SD' Damping factor	Mean damping factor by experiment system	Mean damping factor
SDF-HF System	4.0	0.94	0.88	0.89
	6.0	0.96		
	8.0	0.88		
	10.0	0.81		
	12.0	0.82		
SDF-SL System	2.0	0.94	0.90	
	3.0	0.98		
	4.0	0.95		
	5.0	0.91		
	6.0	0.84		
	6.0	0.84		
	7.0	0.84		

4. Comparison of Maximum and Minimum Pressure in Two Systems

4.1 Purpose

As stated above, SHASE-S218 stipulates that allowable pressure in drains should be within $\pm 400\text{Pa}$ in order for a system to fulfill the criterion. It means that maximum pressure $P_{s\ max}$ and minimum pressure $P_{s\ min}$ must not exceed the $\pm 400\text{Pa}$ range. In view of this we checked the decreasing rates of $P_{s\ max}$ and $P_{s\ min}$ when traps were connected.

4.2 Method

$P_{s\ max}$ and $P_{s\ min}$ in each experimental condition were calculated and their differences were compared with or without traps for each experimental drainages system. The system's maximum pressure with traps is noted as $P_{s\ max}$, minimum pressure with traps as $P_{s\ min}$, maximum pressure without traps as $P'_{s\ max}$, and minimum pressure without traps as $P'_{s\ min}$. Their decreasing rates were calculated and compared. Also similar comparison was made with processing with 3Hz LPF.

4.3 Result

Changes in maximum and minimum pressures are shown in Figure 7 and decreasing rates in Table 5. By and large, the decreasing rates for the both systems were lower than 1 when traps were connected. However, $P_{s\ max}$ values were unstable, and some fluctuations were seen in decreasing rates. The mean values of $P_{s\ min}$ were about 0.90 for both with LPF and without LPF. Therefore it can be assumed that the minimum pressures were declined by about 10% if traps were connected.

Depending on the discharge flow load, some experimental results without traps exceeded the criterion of SHASE-S218, and some with traps fulfilled the criterion. Considering this, we think it necessary to prepare separate test criteria, one used for test with traps and the other for test without traps.

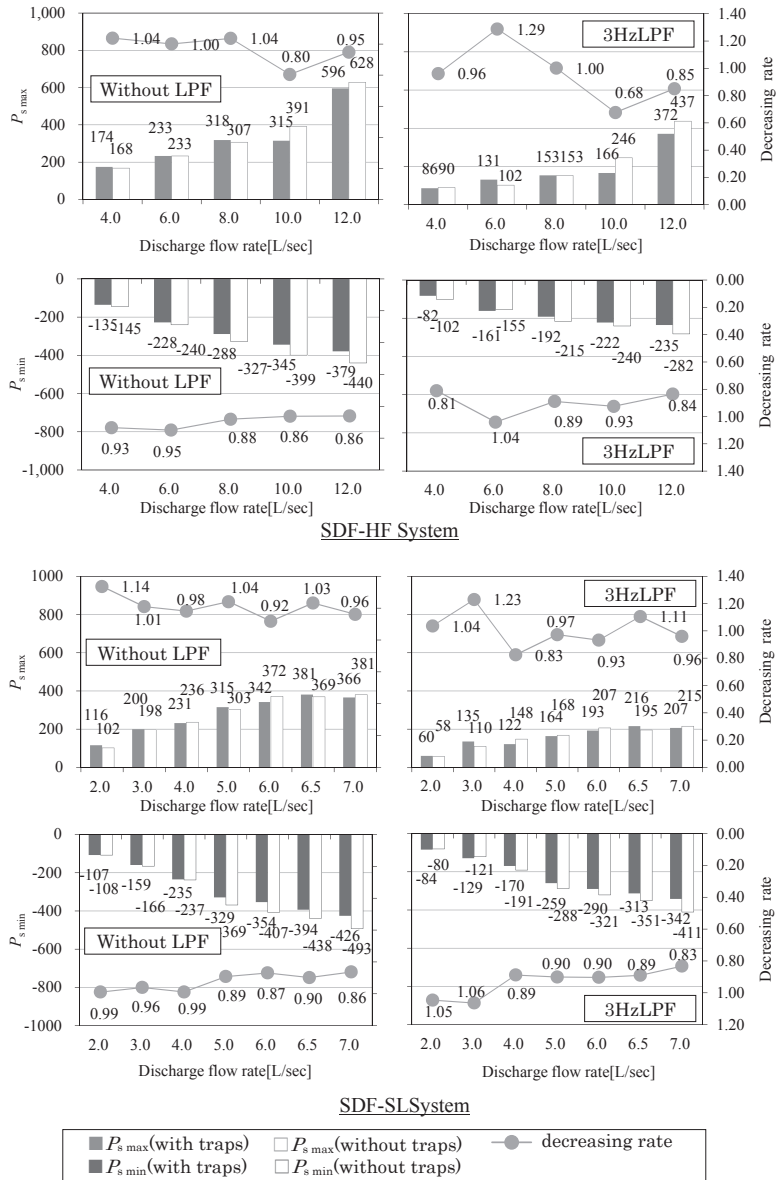


Figure 7 Changes in system maximum / minimum pressures with and without traps

Table 5 Decreasing rates of maximum / minimum Pressure with traps

Pressure	Data processing	Experiment system	Decreasing rate	Mean decreasing rate
$P_{s \max}$	Without processing	SDF-HF	0.97	0.98
		SDF-SL	0.99	
	3HzLPF	SDF-HF	0.96	0.96
		SDF-SL	0.96	
$P_{s \min}$	Without processing	SDF-HF	0.90	0.90
		SDF-SL	0.90	
	3HzLPF	SDF-HF	0.90	0.89
		SDF-SL	0.88	

5. Power Spectrum Analysis

5.1 Purpose

Power spectrum analysis was conducted on the data of seal water fluctuations of traps, and pressure vibrations in drain with and without traps that were obtained in the experiments, and distribution of dominant frequencies were checked.

5.2 Method

Power spectrum analysis was conducted on the pressure vibrations in drain with traps, pressure vibrations in drain without traps and seal water fluctuation, and their power spectrum density distributions were compared. The range of spectrum analysis is shown in Figure 8 and spectrum processing conditions in Table 6.

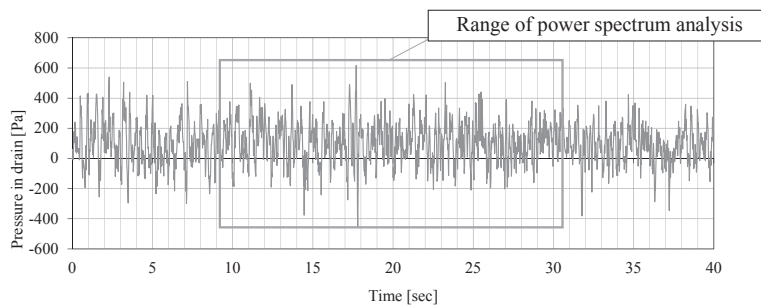


Figure 8 Range of power spectrum analysis

Table 6 spectrum processing conditions

Algorithm	Sande-Tukey
Window function	Hanning Window
Smoothing band width	0.15Hz

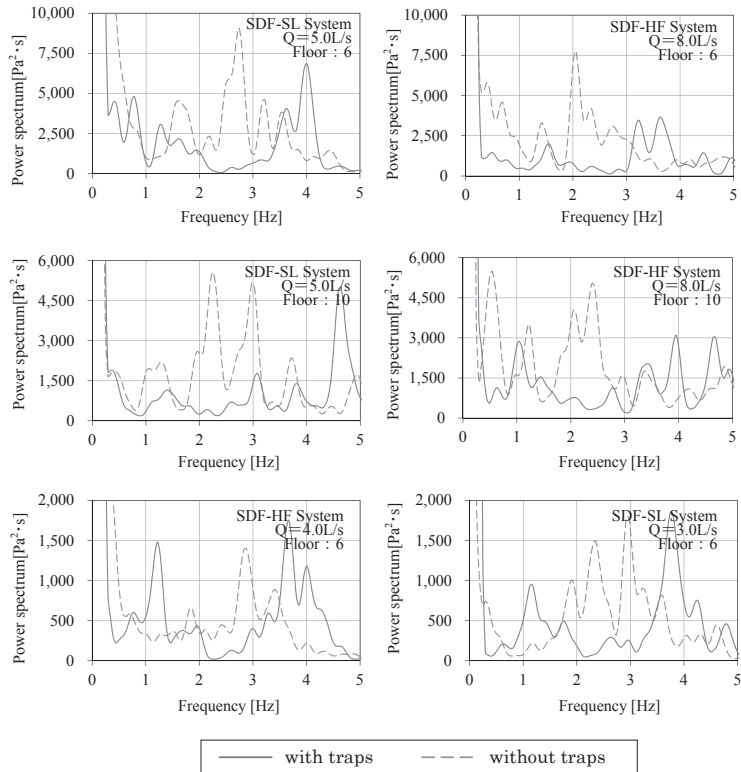


Figure 9 An examples of power spectrum density distribution

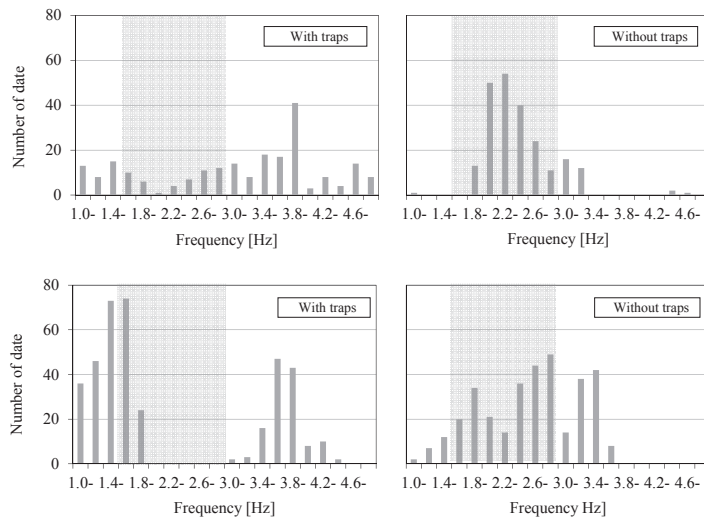


Figure 10 Histograms of primary dominant frequency

5.3 Result

An example of power spectrum density distributions is shown in Figure 9. The distributions differ greatly with and without traps. While dominant frequencies without traps fall within the 2 ~ 3 Hz range at all discharge flow loads, those with traps drop close to 0 in the same range. In view of this we checked how often the primary dominant frequency PS_I appeared in each frequency range. Histograms of PS_I with and without traps in each experimental system are shown in Figure 10. The results show obvious differences in the distribution of PS_I in the SDF-HF system. PS_I appeared infrequently in the 1.5 Hz ~ 3 Hz range (characteristic frequency of general traps) in conditions with traps, but more often in the same range in conditions without traps. This tendency was also seen in the SDF-SL system with no primary frequencies seen in the 2.0 ~ 3.0 range in conditions with traps. This seems to indicate that the distributions of PS_I vary with and without traps.

6. Conclusion

In this study we conducted experiments using a real-scale drainage tower, and analyzed pressures in drain and seal water fluctuations to clarify the effects of traps on pressure in drain, which are associated with discharge load. The results can be summed up as follows:

- 1) Pressure vibration waveforms in drain damped by 10% if traps were attached to drain pipes.
- 2) System minimum pressures also decreased by 10% in the same way as pressure vibration waveforms if traps were attached to drain pipes.
- 3) The presence or absence of traps greatly affected the power spectrum density distribution as well as the primary dominant frequency distribution.

Although the present study has clarified the changes in vibrational amplitudes and frequencies of pressure, which were brought about by the presence or absence of traps, it did not go far enough to unravel the mechanism of producing such changes. Therefore, further studies based on detailed experimental conditions in a real-scale drainage tower and analysis of pressure in drain and seal water fluctuation are called for in the future.

7. Reference

1. Sakaue K., Kamata M., Ohtsuka M., Saitoh H., Tsukishima K. (1992), The Method of Test for Capacity of Drainage System, *Proceedings of CIB W062 International Symposium* (pp. 231-244)
2. Sakaue K., Kamata M., Zhang Y. (2007), A Study on the Test Method of Trap Performance, *Proceedings of CIB W062 International Symposium* (pp. 321-332)
3. Sakaue K., Kamata M., Ohtsuka M., Saitoh H., Tsukishima K. (1992), The Method of Test for Capacity of Drainage System, *Proceedings of CIB W062 International Symposium* (pp. 231-244)

8. Presentation of Authors

Kazuya Fujimura is a mechanical engineer at Mitsubishi Jisho Sekkei Inc. He finished the master's course in Architecture at Meiji University in Japan. He is engaged in research / development of drainage plumbing system.



Kyosuke Sakaue (Dr. Eng.)

Professor at Meiji Univ.

He is engaged in research/development of drainage plumbing systems



Takayuki Toyama

KUBOTA Corporation

He is engaged in research/development of drainage plumbing systems



Influence of Type of Discharge Load on Pressure Vibration in Pipes and Seal Water Vibration

K. Fujimura (1), K. Sakaue (2), T. Toyama (3), T. Mitsunaga (4)
M. Takahashi (5)

1. kazuya.fujimura@mj-sekkei.com

2. sakaue@isc.meiji.ac.jp

3. t-toyama@kubota.co.jp

4. mitunaga-t@yamashitasekkei.co.jp

5. mamiko.takahashi@jp.toto.com

(1) Mechanical Engineering Department, Mitsubishi Jisho Sekkei Inc., Japan

(2) Dept. of Architecture, school of Science and Technology, Meiji University, Japan

(3) Japan Industrial Materials Manufacturing Dept., KUBOTA Co., Japan

(4) Mechanical Design Department, Yamashita Sekkei, Inc., Japan

(5) TOTO BATH CREATE LTD., Japan

Abstract

In Japan, SHASE-S 218 (Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard) stipulates the method for evaluating the performance of drainage system. The standard exclusively makes use of steady discharge load, and two test criteria have been laid out: one that allowable pressure in pipe should be ± 400 Pa, and the other that allowable seal loss within 25 mm. However, discharge made from actual drainage system such as WC is mainly fixture discharge load, and as a result of recent development in water-saving fixtures, average discharge flow rate and time began to vary greatly depending on the type of fixture. Therefore, the existing method based on steady discharge load is far from being practical although it provides evaluation of systems on the safe side.

In view of this, we carried out an experiment with a real-scale drainage tower to clarify the effects that steady discharge load and fixture discharge load exerted on pneumatic pressure vibration and seal water vibration.

As a result, pressure vibration waveforms and power spectrum distributions have been found to vary depending on the type of discharge load.

Keywords

Drainage system, trap, induced siphonage, vibration reply phenomena

Analysis of Influence of Connection of WC on Pneumatic Pressure in Pipes

K. Fujimura (1), K. Sakaue (2) , T. Mitsunaga (3)

1. kazuya.fujimura@mj-sekkei.com

2. sakaue@isc.meiji.ac.jp

3. mitunaga-t@yamashitasekkei.co.jp

1. M E P Engineering Department I , Mitsubishi Jisho Sekkei Inc.

2. Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji University, Japan

3. Yamashita Sekkei Inc, Japan

Abstract

In the design of a drainage system, allowable drainage flow quantity (drainage capability) is defined for each pipe diameter in order to prevent seal water from breaking. In Japan, SHASE-S 218 (Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard) stipulates the evaluation standard for drainage capability. Regardless of presence or absence of connection of the traps, there are two types of test criteria. One is that pressure in pipe should fall within $\pm 400\text{Pa}$, and the other that seal loss should be less than 25 mm. Nevertheless, recent studies revealed that connecting of traps attenuates pneumatic pressure in pipes and causes a tendency of power spectrum distribution to change. This phenomenon may be attributable to the fact that seal water vibration is a response phenomenon to pneumatic pressure vibration, and that they affect each other.¹⁾

In view of this, we conducted discharge experiments based on SHASE-S 218 with and without traps (including WC) using a real size drainage experimental system to clarify how the connection of WC might influence pneumatic pressure.

Keywords

Drainage system, trap, induced siphonage, vibration reply phenomena

1. Introduction

In Japan, SHASE-S 218 (Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard) stipulates the test method for drainage capability of drainage stack system. The judging criteria consists of the following two conditions: one that allowable pressure in pipe should fall within $\pm 400\text{Pa}$, and the other that seal loss should be less than 25 mm. Although discharge is made from fixtures with varying flow rates in actual drainage system, constant discharge has been the standard discharge mode used in testing to circumvent the problem of selecting a representative fixture for testing. However, there has only been a few quantitative comparisons of pressure vibration in pipe and seal loss in water-saving sanitary fixtures widely used today and in constant discharge in test conditions, and therefore drainage capability may not have been properly evaluated.²⁾

In view of this, we conducted discharge experiments in a real-scale drainage tower to analyze pressure vibration in pipes and seal water fluctuations, and clarified the effect of WC connection on pressure vibrations in pipes, and the relationship between pressure and seal loss as they occur in constant discharge and fixture discharge.

2. Outline of Real-Scale Drainage Tower Experiment

2.1 Purpose

Experiments were conducted to collect data of pressure vibrations in pipes in horizontal branch drainages on each floor and seal water fluctuations and residual seal depths in various test traps when constant discharge load based on SHASE-S218 was applied.

2.2 Experimental Drainage System

The outline of the experimental drainage system is shown in Figure 1, and dates of experiments and weather conditions in Table 1. The system used in the experiments is a special fitting drainage system equivalent to a fifteen-story building. Test WCs were installed either on each floor between the 2nd and 12th floors, or on 2nd, 7th and 11th floors. When a WC was used in combination with a contrary bell trap, the trap was placed on the 8th floor and the WC on the 9th.

PVC caps were placed at the ends of horizontal branch drainage on the floors where no traps were connected. Discharge load was made from the 13th ~ 15th floors, and load variations were made in terms of load type and flow rate.

Table 1 - Dates of experiments and weather conditions

Experiment condition	WCs		WC Contrary bell trap
	Between the 2 nd and 12 th	2 nd , 7 th and 11 th	
Dates of experiments	September 14, 2015	November 7, 2013	September 15, 2015
Weather conditions	Cloudy	Cloudy	Cloudy

2.4 Test WC and Test Trap

The cross-sectional views of a test trap with a water level sensor and a test WC are shown in Figure 2, their basic parameters in Table 2. WC of siphonic drainage type with 6.0 L per flush was used as test WCs. All traps were filled as default.

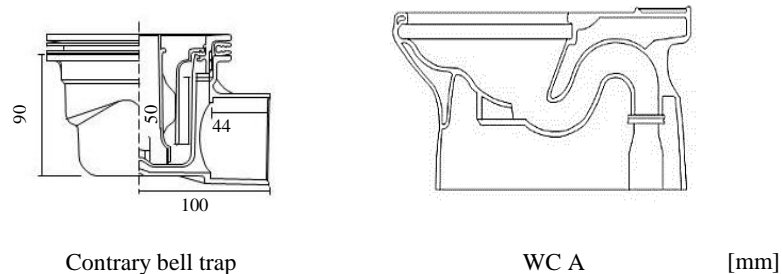


Figure 2 - Cross-sectional views of a test trap and a test WC A

3. Effects of Load Type on Pressure Vibrations in Pipes and Seal Water Fluctuations

3.1 Purpose

Fluctuation wave patterns were analyzed to clarify the pressure vibrations in pipes for each load type and the characteristics of seal water fluctuation.

3.2 Method of Analysis

The wave patterns of pressure vibrations in pipes and seal water fluctuation were compared for each load type. Standard deviations (SD) were calculated and pressure vibrations in pipes and seal water fluctuation were quantitatively compared.

3.3 Results

3.3.1 Constant discharge Load

Figure 3 shows the representative wave patterns of pressure vibrations and seal water fluctuations when WCs were placed on all the floors and three floors. Figure 4 illustrates SD of seal water fluctuation when fixed flow rate load was 4.0 L/s.

The ranges of seal water fluctuation wave patterns for each discharge type increased as the discharging floor got lower. This can be clearly seen in Figure 4. SDs of seal water fluctuation on the 2nd floor for both all-floor WC placement and 3-floor placement were approximately 2.5 times larger than those on the 11th floor. This can be attributed to the fact that the pressure vibration in pipes on the lower floors mainly consisted of positive pressure as opposed to that on the higher floors that consisted of negative pressure.

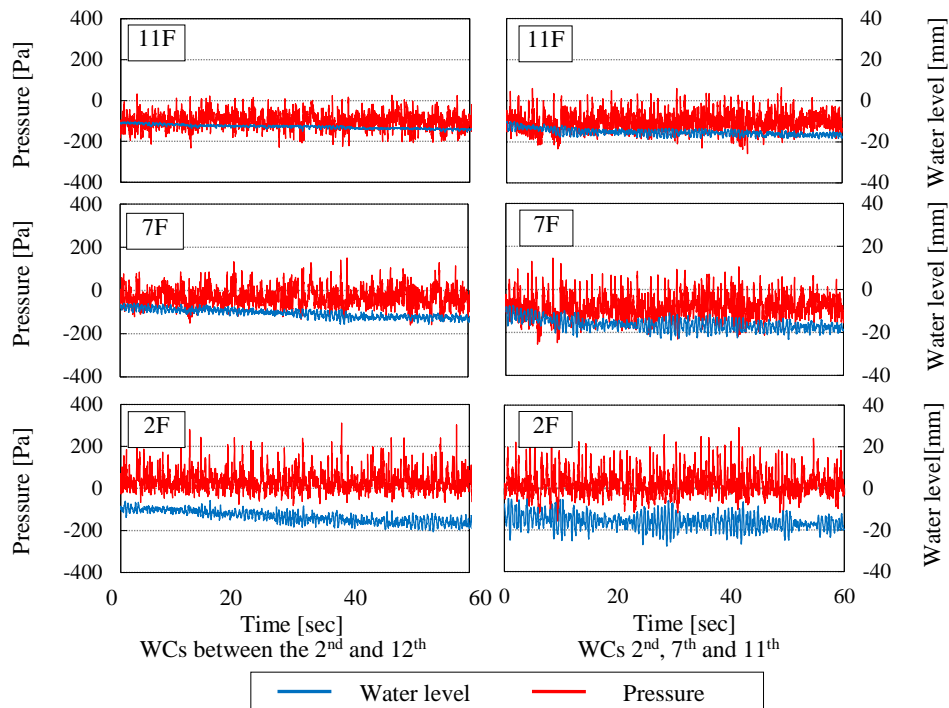


Figure 3 - Examples of pressure fluctuation wave patterns and seal water fluctuation wave patterns (4.0L/s)

Figure 4 also indicates that the range of seal water fluctuation wave patterns in all-floor WC placement was smaller than that in 3-floor placement. It can be assumed that in all-floor placement, seal water on each floor had an influence on pressure vibration in pipes, and as a result pressures in pipes were made to reduce near the floors where traps were connected.

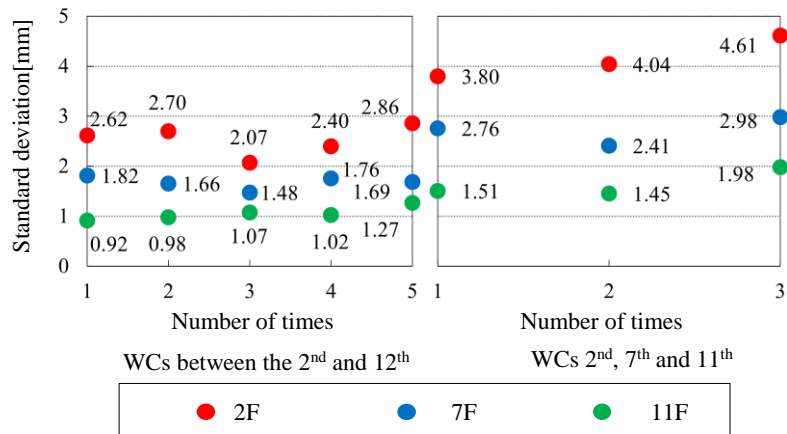


Figure 4 - Illustrates SD of seal water fluctuation(4.0L/s)

3.3.2 Fixture Discharge Load

Figure 5 shows some examples of the wave patterns of pressure vibration in pipes and seal water fluctuation. The wave patterns of seal water fluctuation corresponded with pressure vibration as seal water fluctuated in response to pressure in pipes when maximum pressure was produced right before discharged water passed through, and

then seal loss occurred. Seal water in contrary bell trap had larger range of fluctuation than WC.

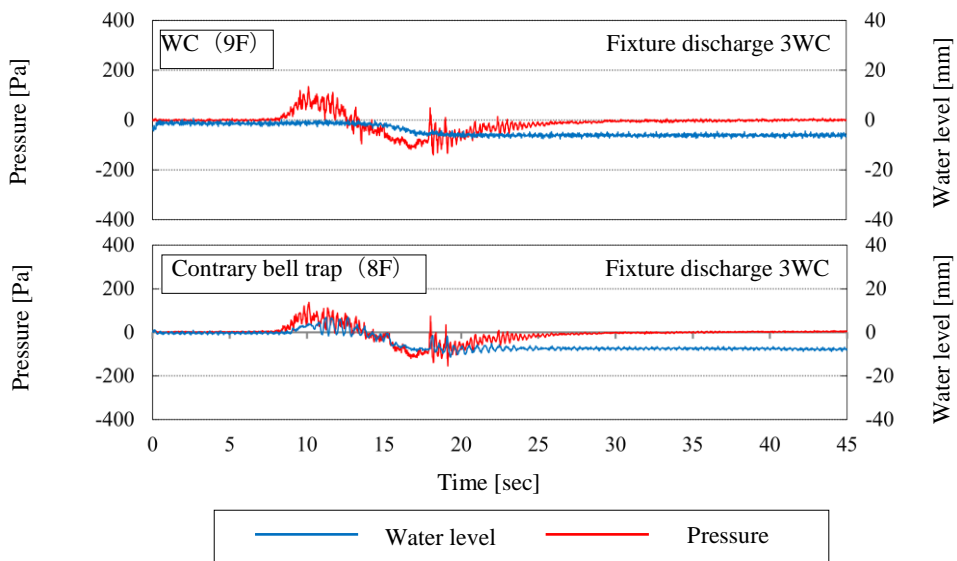


Figure 5 - Examples of the wave patterns of pressure vibration in pipes and seal water fluctuation

3.3.3 Comparison Between Constant Discharge Load and Fixture Discharge Load

SD of seal water fluctuation is shown in Figure 6. Seal water fluctuation wave patterns differed greatly depending on the load type. Figure 6 clearly shows this with SD of seal water fluctuation in contrary bell trap being two to three times larger than that in WC. The structure and water seal of trap may have been the cause of difference in seal water fluctuation among traps.

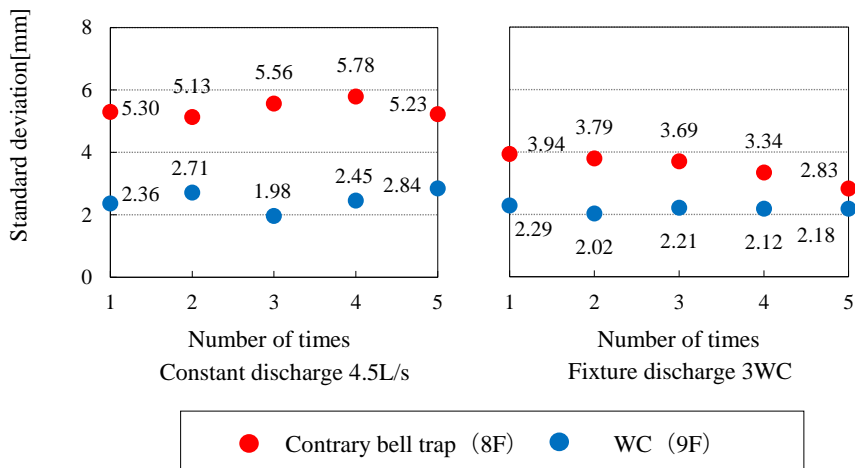


Figure 6 - SD of seal water fluctuation

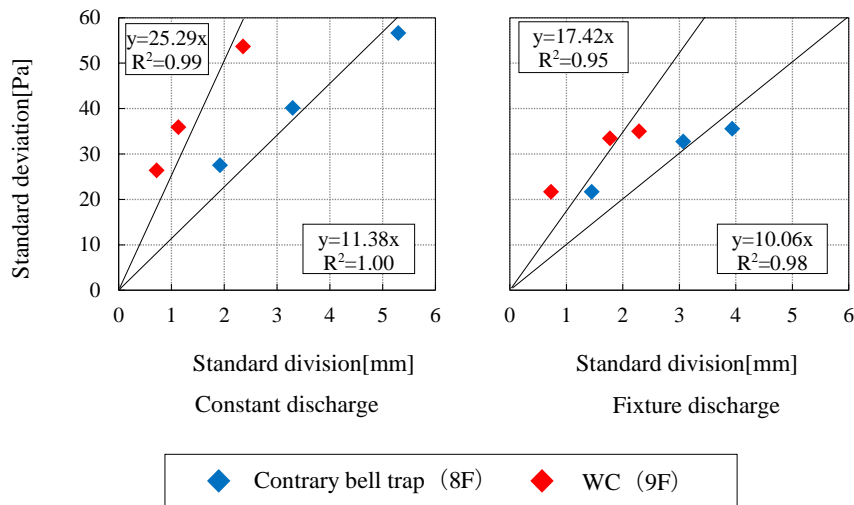


Figure 7 - Scatter diagrams of SDs of pressure vibration in pipes and seal water fluctuation, and their primary regression equations

The scatter diagrams of SDs of pressure vibration in pipes and seal water fluctuation, and their primary regression equations are shown in Figure 7. The regression coefficient a and the ratio of regression coefficient of constant discharge to fixture discharge α are shown in Table 3. From Figure 7, it was found that there is a high correlation between SD of pressure vibration in pipes and SD of seal water fluctuation as the determination coefficient R^2 was 0.95 ~ 1.00, which is quite high for both constant discharge and fixture discharge. The ratio of regression coefficient α was 1.13 for contrary bell trap on the 8th floor and 1.45 for WC on the 9th floor (Table 3).

Table 3 - Regression coefficient a and the ratio of regression coefficient of constant discharge to fixture discharge α Table 4

Floor	Regression coefficient (a)		Ratio of regression coefficient (α)
	Constant discharge	Fixture discharge	
8(Contrary bell trap)	11.38	10.06	1.13
9(WC)	25.29	17.42	1.45

4. Effects of Load Type on Pressure in Pipe and Seal Loss

4.1 Purpose

We conducted experiments in a real-scale drainage tower and analyzed pressures in pipes and seal loss to clarify the relationship between discharge type and seal loss on each floor according to the number of WCs installed, and to quantitatively compare pressure in pipes and seal loss between fixture discharge load and constant discharge load.

4.2 Method

Seal losses in each type of discharge and load were compared. The correlation of seal loss of trap with minimum pressure on the floors where traps were placed was also examined.

4.3 Results

4.3.1 Constant Discharge Load

The relationship of seal loss on each floor in each type of discharge is shown in Figure 8. In constant discharge of 4.0 L/s, seal loss was largest on the 2nd floor and smallest on the 11th floor. This may be explained by the fact that positive pressures dominated on the 2nd floor, and as seen in Figure 3, that seal loss as a result of locally produced positive pressures of 300 Pa overrode seal loss produced by negative pressures. In constant discharge of 6.0 L/s, seal losses tended to be roughly equal on the 2nd, 7th and 11th floors. This seems to have been caused by the comparable negative pressure produced on these floors when discharge flow rate was 6.0 L/s.

4.3.2 Constant Discharge Load

Seal loss on each floor for each discharge type is shown Figure 9. For both contrary bell trap and WC, seal loss in constant discharge was larger than that in fixture discharge. The scatter diagram and primary regression equation for minimum pressure in pipe and seal loss in each load type are shown in Figure 10. The regression coefficient a and the ratio of regression coefficient of constant discharge to fixture discharge α are shown in Table 4. Figure 10 shows that the determination coefficient

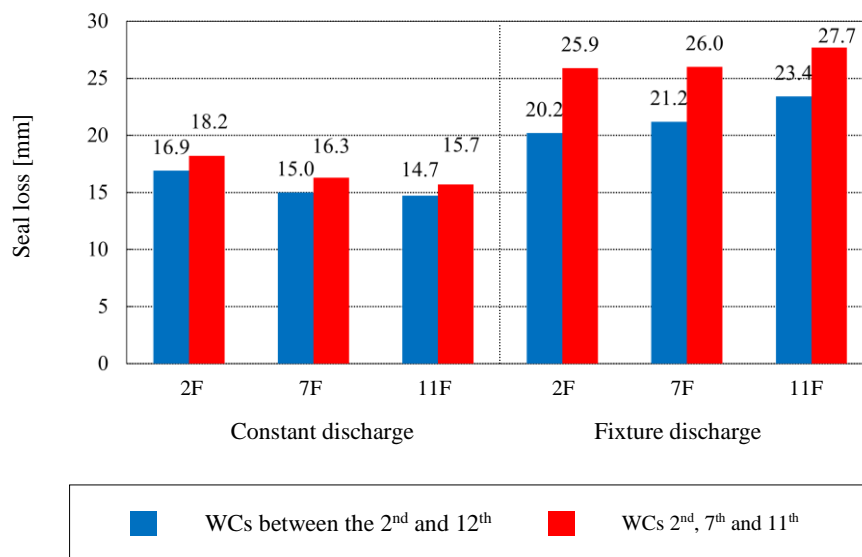


Figure 8 - Relationship of seal loss on each floor in each type of discharge

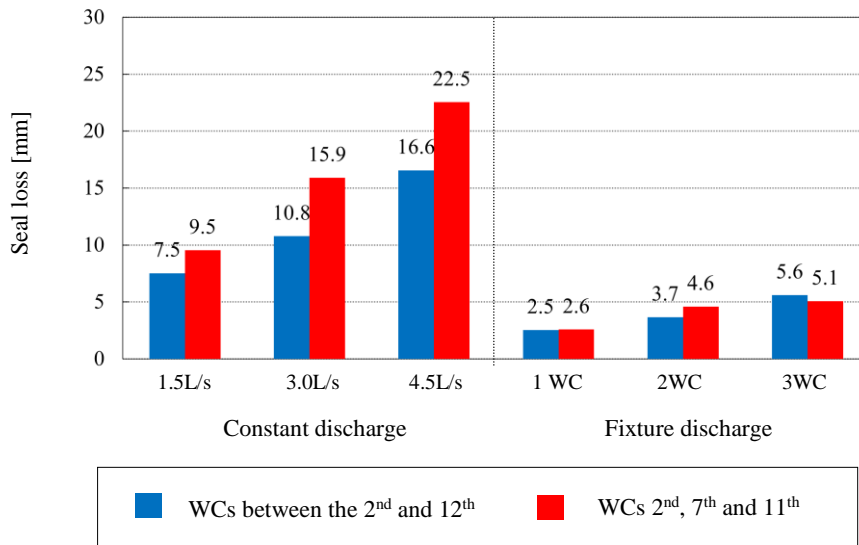


Figure 9 - Seal loss on each floor for each discharge type

R2 was high (0.72 ~ 0.92) indicating a high correlation between minimum pressure in pipe and seal loss. In Table 4, the ratios of regression coefficient for contrary bell trap (8th floor) and WC (9th floor) were 1.63 and 1.98 respectively. From this it can be expected that seal loss in contrary bell trap would be about 1.6 times, and that in WC is about 2 times as large in constant discharge as in fixture discharge given a similar level of negative pressure are present. Also there seems to be a significant difference in the ratio of regression coefficient α among the test traps.

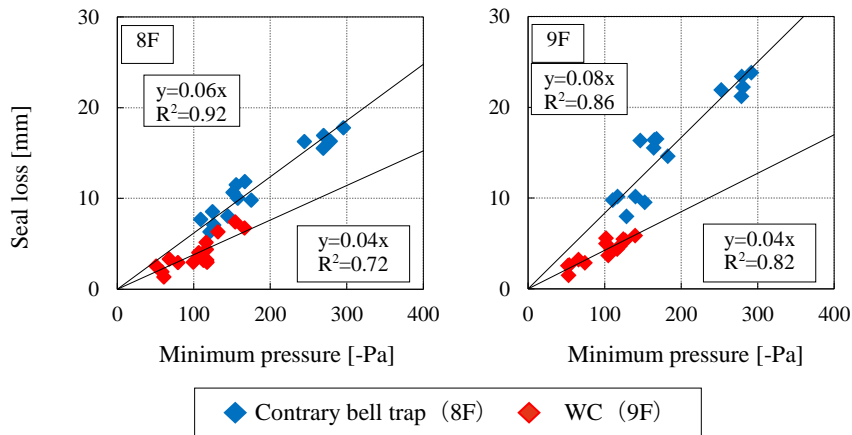


Figure 10 - The scatter diagram and primary regression equation for minimum pressure in pipe and seal loss in each load type

Table 4 - Regression coefficient a and the ratio of regression coefficient of constant discharge to fixture discharge α

Floor	Regression coefficient (a)		Ratio of regression coefficient (α)
	Constant discharge	Fixture discharge	
8(Contrary bell trap)	0.062	0.038	1.63
9(WC)	0.083	0.042	1.98

5. Conclusion

In this study, pressure vibration in pipes and seal water fluctuation data collected in a real-scale drainage tower experiments were analyzed. The results can be summarized as follows:

- 1) The greater the number of WCs installed, the less likely the occurrence of seal loss. The factor here seems to be the water seal of traps that are connected.
- 2) The range of seal water fluctuation wave patterns tended to be larger on the lower floors than on the higher floors.
- 3) Seal loss in contrary bell trap is approximately 1.5 to 2 times larger in constant discharge than in fixture discharge. However, no significant differences in seal loss due to load type were observed in WC.

The problem of reducing seal loss and seal water fluctuation SDs with increasing water seal is yet to be resolved in the future. We also need to give consideration to the method of evaluating the effects of seal loss on pressure vibration in pipes.

6. Reference

1. Fujimura K, Sakaue K., Toyama T. (2013), Analysis of influence of connection of traps on pneumatic pressure in stack pipe, *Proceedings of CIB W062 International Symposium* (pp. 143-154)
2. Takahashi M., Sakaue K., toyama T., fujimura K. (2014), Characteristics of pressure in test drainage system with traps for flow capacity, *Proceedings of CIB W062 International Symposium* (pp. 199-210)

7. Presentation of Authors

Kazuya Fujimura is a mechanical engineer at Mitsubishi Jisho Sekkei Inc. He finished the master's course in Architecture at Meiji University in Japan. He is engaged in research / development of drainage plumbing system.



1. Introduction

SHASE-S 218 (Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Standard) stipulates the method for evaluating drainage system with special fittings. Steady discharge is mainly used as test load, and the test criteria are based on two conditions: one that allowable pressure in pipe should fall within $\pm 400\text{Pa}$, and the other that allowable seal loss should be less than 25 mm. However, in real life conditions, discharge from drainage system such as WC is exclusively fixture discharge load. Though a number of studies have been conducted on steady discharge and fixture discharge and their effects on and relationship with pressure in drain and seal fluctuation, the results of those studies may not be applicable to all situations as more and more advanced water-saving fixtures with varied drainage capacities and discharge time have been developed. In addition, SHASE-S 218 does not specify criteria for selection of fixture discharge that is exclusively used in the performance test as part of a completion inspection.

In view of this, we conducted discharge experiments in a real-scale drainage tower and analyzed pressure vibration in pipe data to clarify the correlation between conventional steady discharge load and fixture discharge load from water-saving WC.

2. Outline of Experiment

2.1 Experimental drainage system

The outline of the experimental drainage system is shown in Figure 1. The system consists of a 15-floor equivalent drainage system with special fittings, which makes possible steady discharge flow rates of 1.5 L/s, 3.0 L/s, and 4.5 L/s based on SHASE-S 218. We collected data of pressure vibration in pipe and seal water fluctuations when fixture discharge load equivalent of one, two or three 6L WCs were applied. We also examined the effects of filth discharge on pressure in drain by measuring pressures when substitute filth was discharged from test WCs.

2.2 Conditions of measurement

Based on SHASE-S 218, discharge load was applied from the top floor and pressure fluctuation data in horizontal drainage branches (at the top of the pipe 500 mm from the center of stack pipe) on each floor were collected. Measurements were made with sampling intervals of 20 msec. (50 Hz) for one minute after discharge rate became steady for steady discharge, and 40 seconds (discharge starting 5 seconds after the beginning of measurement) for fixture discharge. No low-pass filters were used. Measurements were made 5 times under each condition. Substitute filth was discharged from a WC located on the 15th floor.

2.3 Test WC and Test Trap

Cross-sectional views of a test WC and a test trap are shown in Figure 2, and parameters in Table 1. The same types of 6 L WCs were used as a test WC in fixture discharge and in steady discharge. The trap was installed on the 8th floor, and a WC on the 9th floor, both filled with water. The setup of a WC and a trap is shown in Figure 3.

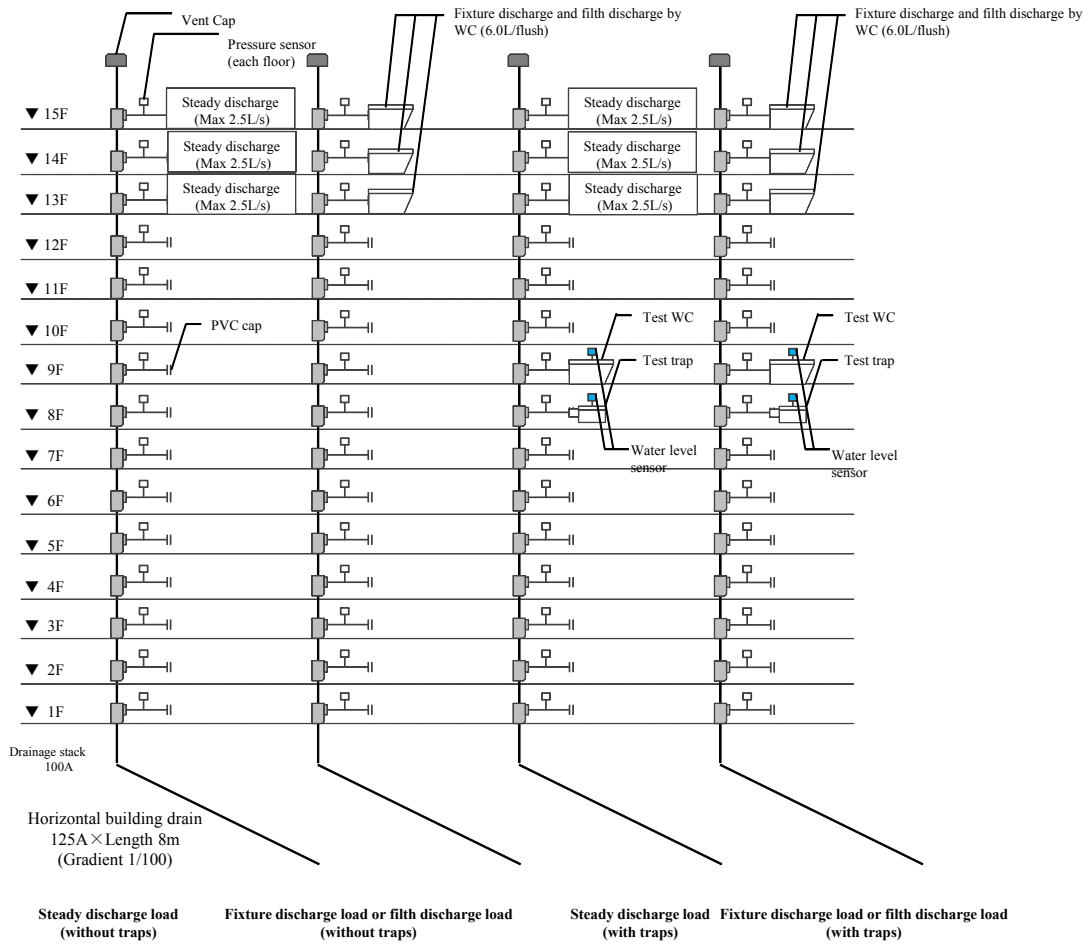


Figure1 Outline of the real-scale drainage tower

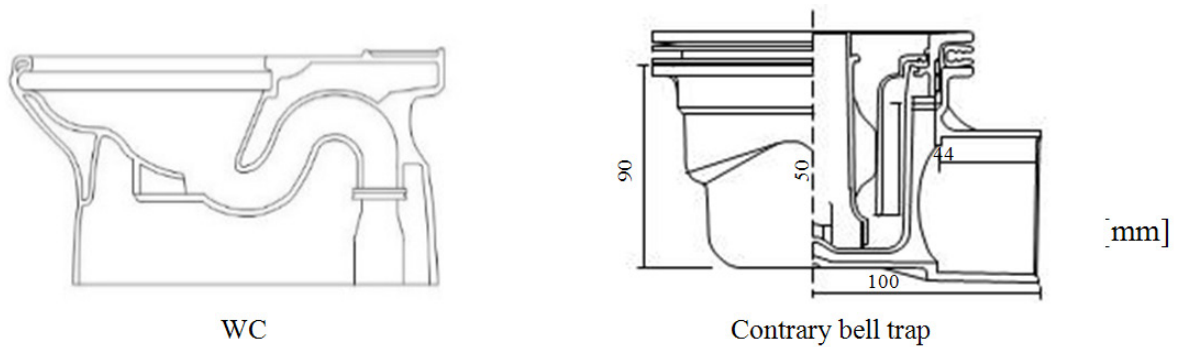


Figure2 Outline of test trap and test WC

Table1 Parameters of test traps and test WC

	Ratio of leg' s sectional areas [-]	Seal depth [mm]	Seal volume [mL]	Natural frequency [Hz]	Average flow rate of fixture [L/s]
WC	0.16	58	2,400	1.27、 2.47	2.2
Contrary bell trap	1.07	50	330	2.34	-



WC



Contrary bell trap

Figure3 Installation conditions of the test WC and test trap

2.4 Substitute Filth

As stipulated in JIS P 4501, four 90 cm long toilet tissues were folded and bundled together to make a standard substitute filth (referred to as a standard below). A standard was placed in the center of the WC where water is half full with the substitute's cut side facing the front of the WC. After the first bundle soaked in, the second one was thrown in; when all four of them were in, discharge was made with a "large flush." Another set of experiments using bundles 1.5 times the size of a standard (six tissues folded and bundled, referred to as a standard $\times 1.5$) was conducted to examine the effect of filth on pressure in drain.

3. Analysis of Pressure Vibrations in Pipes

3.1 Pressure Vibration Waveforms

3.1.1 Purpose

Steady discharge and fixture discharge are significantly different in their discharge time and instantaneous maximum discharge flow rate. Therefore, we compared pressure vibration data obtained from steady discharge, fixture discharge and filth discharge.

3.1.2 Method

Based on the data of pressure vibration obtained in a real-scale discharge tower, we examined steady discharge flows with 1.5 L/s, 3.0 L/s, 4.5 L/s, fixture discharge flows from one, two, and three fixtures, and standard and standard $\times 1.5$ filth discharge flows by superimposing their waveforms.

3.1.3 Results

An example of pressure vibration waveforms from steady discharge and fixture discharge superimposed on graphs is shown in Figure 4.

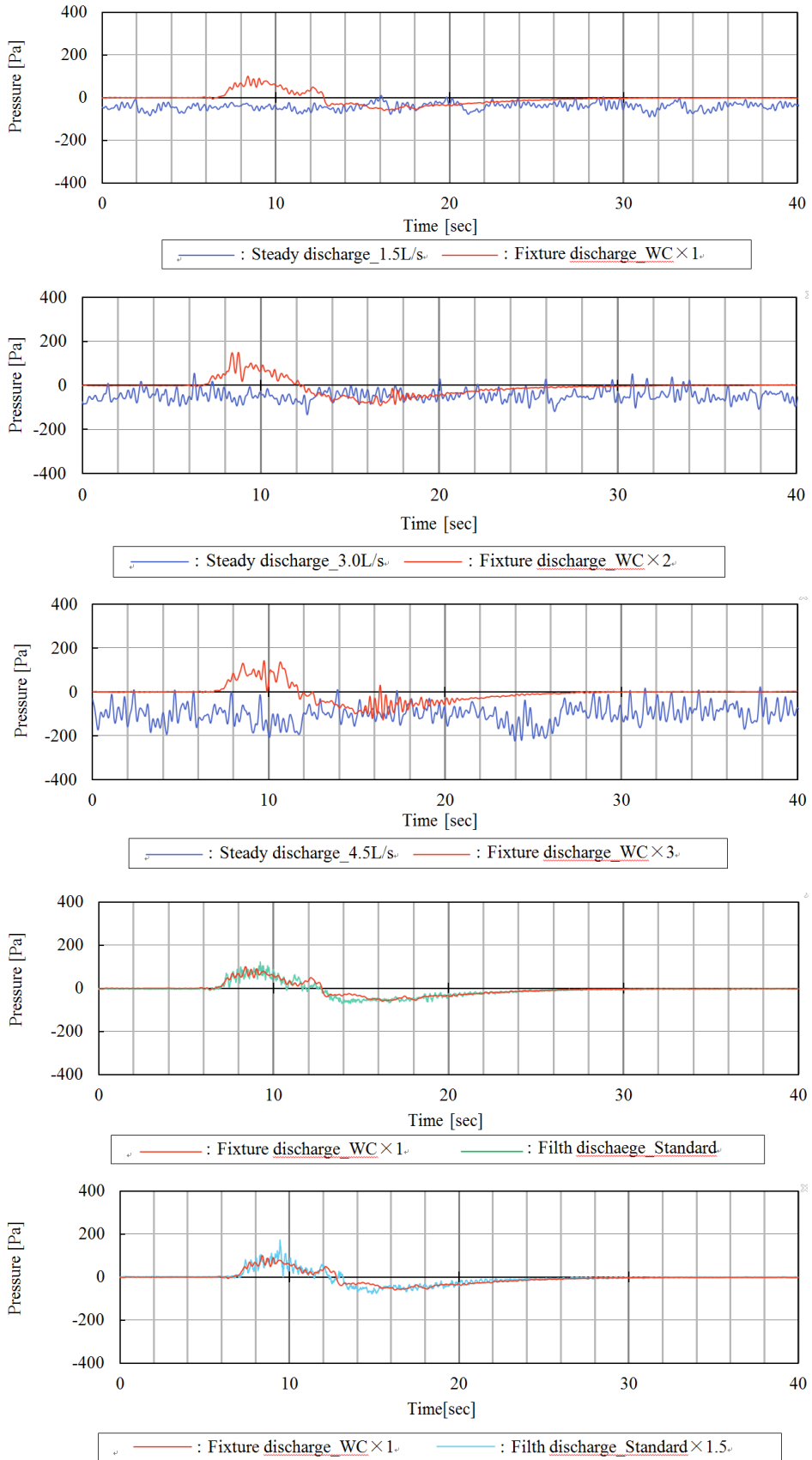


Figure4 Comparison of pressure vibration waveforms from type of discharge load (An example)

From Figure 4, it can be seen that average pressure values tended to continue vibrating on the negative side in steady discharge while in fixture discharge considerable positive pressures were produced first and then they made a large sudden swerve to the negative side before becoming stable near "0." This can be explained by the fact that in fixture discharge water passes through the drain pipe only for a moment recording a positive pressure on a measuring device and then pressure dies down quickly while set amount of water continues to flow through the pipe in steady discharge. It has also been observed that pressure fluctuation went up in tandem with increase in discharge load from 1.5 L/s, 3.0 L/s to 4.5 L/s in steady discharge while the maximum and minimum pressures in pipes rose as the number of fixture increased in fixture discharge. The minimum pressure of steady discharge was larger than the minimum pressure of fixture discharge, but the maximum pressure was smaller than that of fixture discharge. In filth discharge larger maximum pressures were recorded as the number of filth increased, but no significant changes were observed in the negative pressures. This may be attributable to small amount of filth matter.

3.2 Pressure Profile

3.2.1 Purpose

Previous studies have demonstrated that pressure in drain decreased when test traps were attached (referred to as with traps below) to drainage systems compared with when PVC caps were attached (referred to as without traps below). In view of this we compared pressures in drain with traps and without traps.

3.2.2 Method

We compared pressure in drain profiles with traps and without traps by applying 3 Hz low-pass filters to the data obtained from the experiments and making graphs by the type of discharge load.

3.2.3 Results

Pressure in drain profiles by the type of discharge loads are shown in Figures 5 ~ 7. In this experiment test traps were installed on the 8th and 9th floors, but there have been no differences between pressure in drain with and without traps. It can be assumed that relatively small discharge flow rates applied in the experiment produced only minimal pressure in drain, which wasn't large enough to create fluctuations in pressure attributable to the presence or absence of traps. The fact that test traps were installed only on two floors may also have contributed to the less than significant differences. It has been observed that fixture discharge load produced larger maximum positive pressure than steady discharge load. Generally speaking, upward air flow occurs inside drainage stack while no discharge is being made due to temperature differences. Large positive pressure can occur when this upward air flow comes in contact with downward air flow produced by fixture discharge.

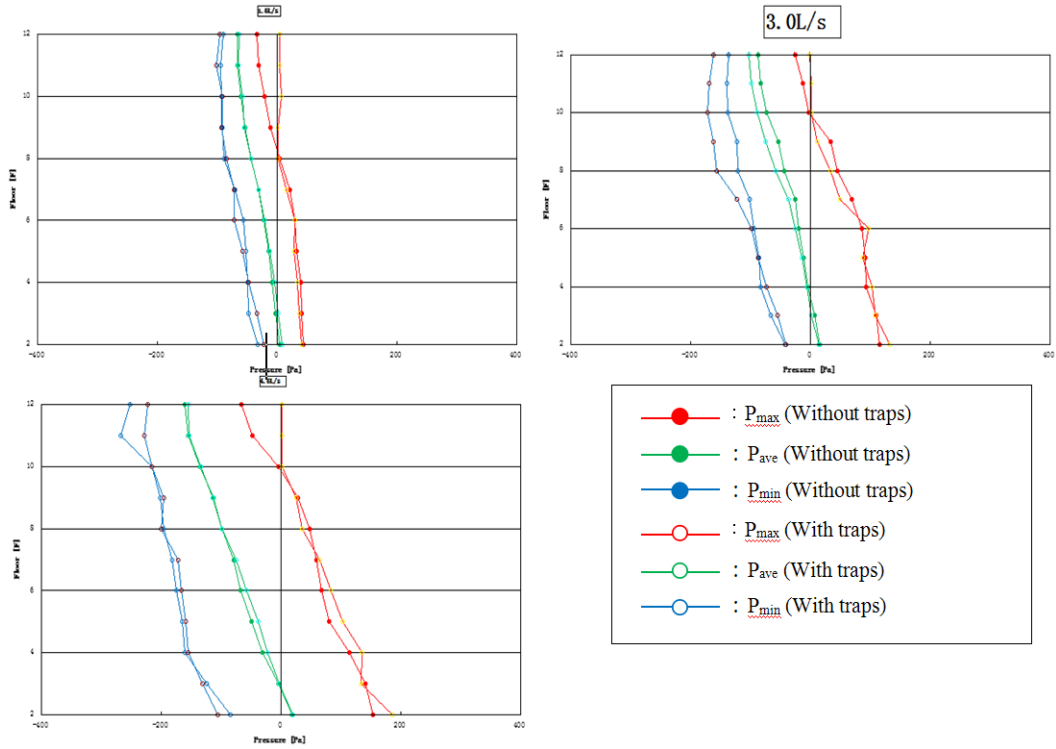


Figure5 Pressure profile by steady discharge load

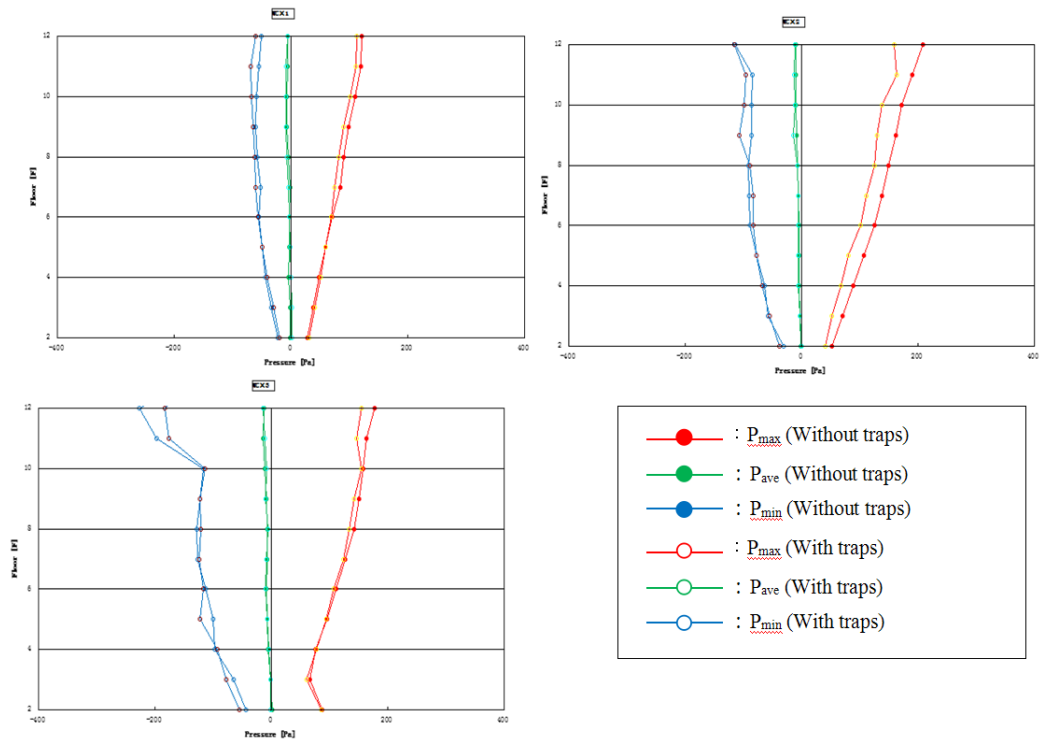


Figure6 Pressure profile by fixture discharge load

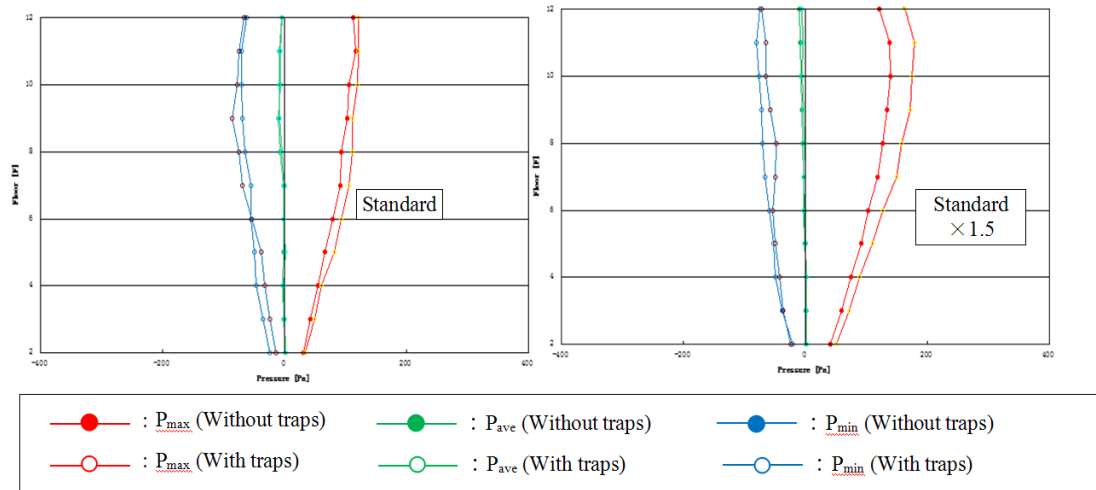


Figure7 Pressure profile by filth discharge load

4. Power Spectrum Analysis

4.1 Purpose

Power spectrum analysis was conducted on the pressure vibration in pipe with and without traps, and the distributions of dominant frequencies were examined.

4.2 Method

Power spectrum analysis was conducted on the pressure vibrations in pipe with traps and pressure vibrations in pipe without traps. As shown in Figure 8, the largest peak in the power spectrum density distribution is called the first dominant power spectrum (referred to as First PS), and the second and third largest peaks Second PS and Third PS respectively.

4.3 Results

The dominance order and frequencies of pressure vibrations in pipe in steady discharge and fixture discharge are shown in Figures 9 and 10.

As can be seen in Figure 9, there have been no significant differences in First PS distribution with or without traps on both 8th and 9th floors at discharge loads of 1.5 L/s and 3.0 L/s. However, at a discharge load of 4.5 L/s, first dominant frequencies aggregated in the 1 ~ 3 Hz range without traps while no prominent patterns in distribution were seen with traps. The characteristic frequencies of the traps connected may have been in that range in the first place.

Figure 10 indicates that there were no differences in distribution of first dominant frequencies with or without traps in fixture discharge load. However, second dominant frequencies showed similar tendencies to those in steady discharge load at a discharge load of 4.5 L/s.

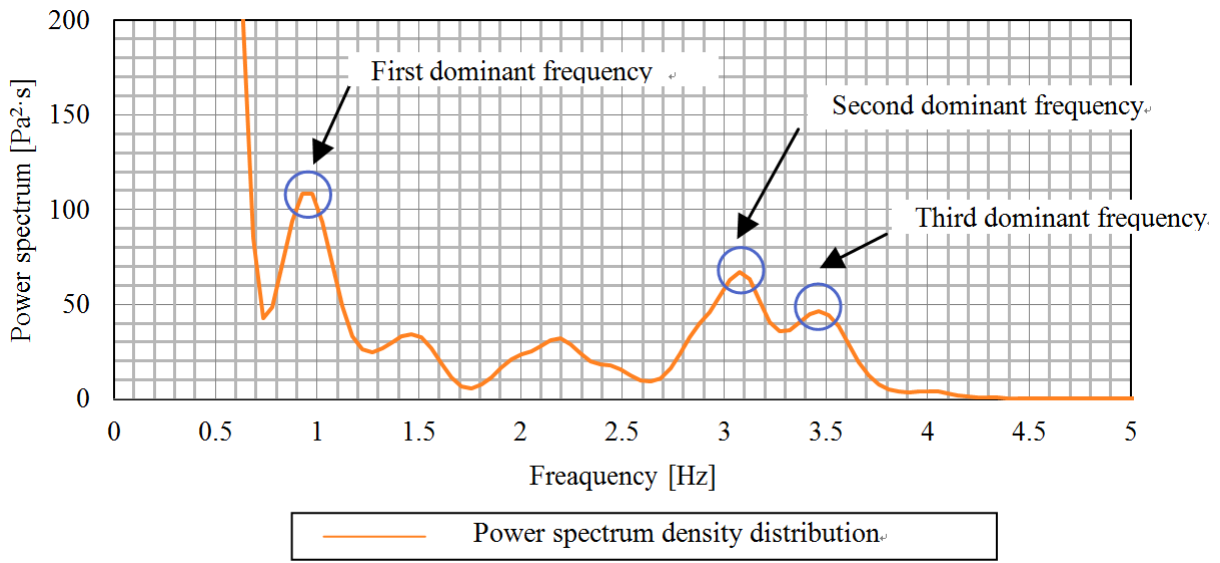


Figure8 Concept of dominant frequencies

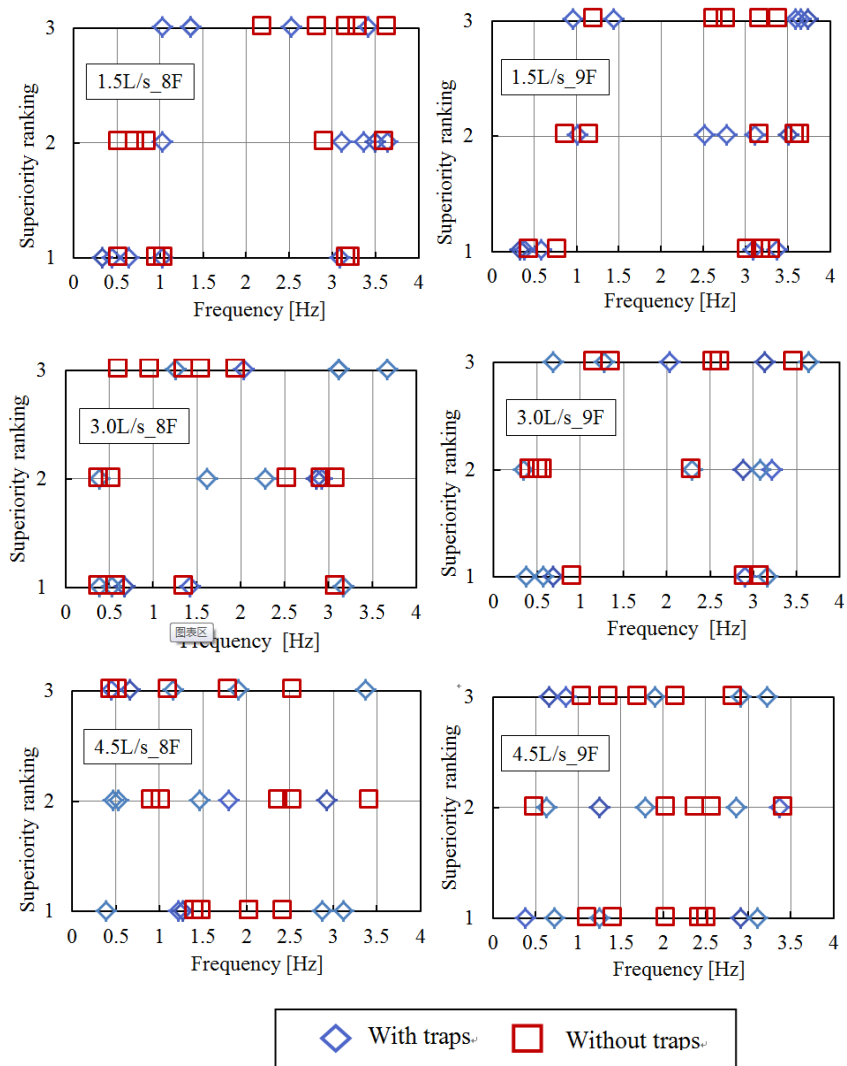


Figure9 Dominant frequency by steady discharge load

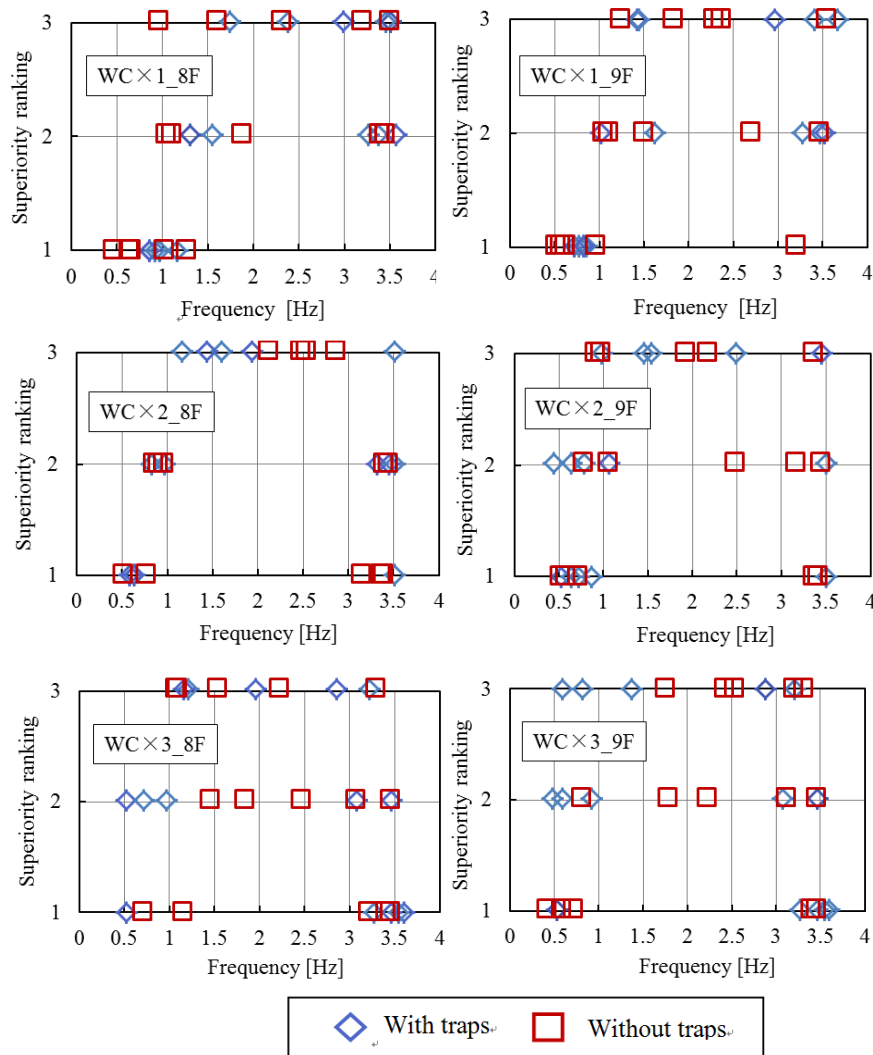


Figure10 Dominant frequency by fixture discharge load

5. Conclusion

In this study, we have analyzed pressures in pipe and seal water fluctuations measured in experiments conducted in a real-scale drainage tower. The results can be summarized as follows:

- 1) There have been no differences in pressure in pipe with or without traps as discharge loads applied in the experiment were not large enough pressure to produce noticeable effects.
- 2) As a result of power spectrum analysis conducted on pressure vibrations in pipe, the distribution of first dominant frequencies with trap in steady discharge load showed some difference from those without traps at a discharge load of 4.5 L/s. There has been no such tendency seen in fixture discharge load.

Further experiments with various types of test traps are called for in the future to quantitatively assess fixture discharge and steady discharge.

6. Reference

- 1.Fujimura K, Sakaue K., Toyama T. (2013), Analysis of Influence of Connection of Traps on Pneumatic Pressure in Stack Pipe, Proceedings of CIB W062 International Symposium (pp. 143-153)
- 2.Sakaue K., Kamata M., Zhang Y. (2007), A Study on the Test Method of Trap Performance, Proceedings of CIB W062 International Symposium (pp. 321-332)
- 3.Sakaue K, Kamata M., Ohtsuka M., Saitoh H., Tsukishima K. (1992), The Method of Test for Capacity of Drainage System, Proceedings of CIB W062 International Symposium (pp. 231-244)

7. Presentation of Authors

Kazuya Fujimura is a mechanical engineer at Mitsubishi Jisho Sekkei Inc. He finished the master's course in Architecture at Meiji University in Japan. He is engaged in research / development of drainage plumbing system.

