

表-4に見るように、濁度が0.1度での出現率の振れ幅は0.05～1.67%、0.5度では0.003～0.11%であり、都市により各濁度での出現率には大きな差がある。しかし、濁度に反比例して出現率が著しく低下することは共通であり、水質基準の1/2である濁度1.0での出現確率は0.0005～0.03%であって、極めて小さい。すなわち、濁度1.0が出現する事例はごく稀であることになる。なお、調査期間中に6都市の水道で出現した濁度の最大値は、0.44～2.2度であり、1度以上はごく稀に発生している。

表-4 各都市のデータ数、濁度の最大・最小値、各濁度での出現率(%)

都市		P	Q	R	S	T	U
データ数		3,287	8,774	1,511	10,227	10,227	11,688
濁度;Min-Max		0.00～0.44	0.00～0.46	0.00～1.00	0.00～2.18	0.00～0.46	0.00～1.16
濁度 (度)	0.1	0.4261	0.1924	1.6722	0.1247	0.2819	0.0495
	0.5	0.0171	0.0042	0.1066	0.0027	0.0087	0.0053
	1	0.0043	0.0008	0.0326	0.0005	0.0019	0.0020
	2	0.0011	0.0002	0.0099	0.0001	0.0004	0.0008

水道水の色度に関しても同様な検討を行なったが、濁度の場合と同様に、都市により各色度での出現率(%)には差があり、色度に反比例して出現率が著しく低下する。しかし、濃度(度)単位で比較する時、色度における出現率は濁度よりも圧倒的に高い傾向を示している。すなわち、色度0.5度の出現率は約1%以上であり、比較的頻繁に発生していることになる。なお、4～5度の色度出現率はきわめて小さいが、調査期間中に5都市の水道で発生した色度の最大値は1～4.3度であり、ごく稀に発生している。

### 3-4 水道事業体における水質異常判断の現状に関する調査

此処では、水道事業体における平成19年度の「水質検査計画」を参考にして水質の自動計測・監視を実施している18都市の水道事業体を選び、質問表を送付して調査した。質問の内容は、各事業体の①閾値の設定の状況と監視方法、②異常値が検出されたときの対応方法、③自動測定機器の自動チェック・自動補修機能、④自動測定機器の維持管理方法、⑤その他 についてである。

以下において、調査結果の主要部分の概要について述べる。

#### 3-4-1 各都市の閾値

各都市の考え方やおかれている状況等によるものと思われるが、設定された閾値は都市により大きく差がある。その概要は表-5の通りであり、濁度や色度に関しては、水質基準値を上限として設定している都市が多いが、より厳密な設定をしている都市もある。

表-5 各都市の閾値の概要

水質項目	単位	閾値の範囲	備考
濁度	度	0 ～ 2	未定の都市あり
色度	度	0 ～ 5	未定の都市あり
残留塩素	mg/L	0 ～ 1.5	未定の都市あり
電気伝導率	mg/L	100 ～ 500	未設定や未測定の都市あり
pH	—	5.8 ～ 8.6	未設定や未測定の都市あり
水温	℃	12 ～ 45	未設定や未測定の都市あり

#### 3-4-2 アラーム発生時の対応

各事業体で実施している対応あり方は区々であるが、その基本的な対応の流れは、①異常値の確認→②原因追求→③修理・修繕→④報告 の経路をとっていると理解された。

#### 3-4-3 測定機器の定期点検と維持管理

此处では、機器に対する定期的検査頻度および検査の実施主体に焦点を当てて「定期的検査」の内容をまとめたものを表-6に示す。

表-6に見るように、その実態が不明な事業体を除いて、一部の事業体では職員が一部の定期検査を実施しているが、大部分は、その定期検査を「業者やメーカー」に委託していると考えられる。

一方、定期検査頻度は4～12回/年であるが、残留塩素計に対しては12回/年としている事業体が多く、他の測定器に対しては4回/年としている事業体が多い。

表-6 測定装置・器具の定期的検査状況

都市、企業団 No.	残留塩素計		他の測定器		補充・交換・他		備 考
	職員	業者	職員	業者	職員	業者	
1		12		12			
2		12		12		1	
3	定期巡視		定期巡視				
4			6				故障時は業者が直ちに対応
5		12		12			
6		4		4			濁度計光源ランプは規定値超過時に交換
7		12		4			残塩、濁度、色度、pHの精密点検:1～6年
8		4		4			個々の機器点検につき記載あり。都市7も同様
9		1		1			定期点検時に消耗品も同時交換
10	12			4	1～2		交換は必要に応じて実施
11	12			4	1		交換は必要に応じて実施
12		12		4	2		
13		12		1(精密点検)			
14	4		4	1(定期・精密)	1		
15		12		12	12		ゼロ点・スパン補正、電極掃除、シカゲル・ビース'交換
16		—		—			
17		メーカー委託		メーカー委託			
18		4		4			

註 1)残留塩素計と他の機器と区別して記載したが、機器の記載の無い時には、両方に、回答の回数を記載  
 2)回答から、実施主体が明らかに「職員」「メーカー・業者」と記載されている時は所定欄に記載  
 実施主体が記載されていないときは、欄を跨いで記載  
 3)機器および実施主体が不明の時は、4欄を跨いで記載

#### D, 考察

以上のように各年度の研究概要を記述してきたが、研究目的との関連性において重要と思われる事項についてまとめると以下の通りとなる。

●17年度には、主として、水道水質変動の推定および給水水質の変動幅に関して検討した。

原水水質（水温、pH、濁度、）と河川流量を説明変数とする重回帰式による水道水質の経日変動推定の可能性を検討した結果、EC および残留塩素の経日変動はかなりの精度で推定できるが、濁度や色度推定精度は低いものであった。

また、配水管網内水質の変動幅に関して検討した結果、「ECと残留塩素」の変動幅は、平均値 ± 3σの範囲内にあり、「濁度および色度」は、平均値 +6～9σの範囲内にあった。一方、重回帰式による推定値に基づいて変動幅を設定する場合、推定精度の高い「ECや「残留塩素」においては、それぞれ、「推定値 ± 3～11σ」の範囲内に収まっているが、推定精度の低い「濁度」や「色度」においては、平均的に、「推定値 + 20～30 σ」の変動幅の範囲内にある事が認められた。

なお、ここでは検討しなかったが、上記以外の閾値方法も適用できるものと考えられる。

●18年度の研究では、水質異常が検出された特定の給水栓と比較対照とするべき給水栓の選定方法に関する検討を意図して、クラスター分析による配水管網内での水質分布の検討と、異系統浄水の混合に伴う給水水質変動の検討を行った。

配水管網内での水質分布は、浄水場数増大と配水系統が複雑になるにつれ、平面的な一様性を失う。したがって、比較対照とするべき給水栓の選定に於いては、予め、配水系統と配水区域との関連性を明確にしておく必要がある。一方、配水比率に応じた各配水の混合により給水水質が形成されるものと仮定した式に基づく計算値は、巨視的に見れば、大凡の水質変動を反映していると考えられ、この方法も比較対照とするべき給水栓の選定に際して活用できると考えられる。

●19年度には、給水システムにおける水質異常の代替指標としての濁度・色度変動と原水水質変動との関連性および飲料水水質基準超過確率の検討と、併せて、事業体における水質管理の状況を調

査したが、以下の諸点が明らかとなった。

1) 総じて、水道水の濁度は原水濁度の変動と関連性を持っているように思われる。ただ、色度は、濁度よりも関連性が低いようである。此处で、前記の現象と本研究との関連性を考える時、給水末端の水質異常の監視に際して、原水の高濁度時にはとりわけ留意するべきであることを示唆していると考えられる。

2) 濁度の出現率は、都市により大きな差があるが、濁度に反比例して出現率が著しく低下することは各都市で共通である。濁度 1.0 での発生確率は 0.0005~0.03% であって極めて小さいが、調査期間中において 6 都市で出現した濁度の最大値は 0.44~2.2 度であった。

一方、色度は、濁度と同様な傾向を持つが、濃度(度)単位で比較する時、色度における出現率は、濁度よりも圧倒的に高い傾向を持つ。調査期間中に 5 都市の水道で発生した色度の最大値は 1~4.3 度であった。

3) 水質監視の状況について 18 都市から回答を得た。設定された閾値は都市により大きく差があるが、濁度や色度に関しては、水質基準値を上限として設定している都市が多いことが明らかとなった。

4) 上記の 1)、2)、3)の結果を考慮すると、給水末端に設置する水質監視装置における水質異常判定の閾値は、飲料水質基準値近傍に設定するのが望ましいと考えられる。

#### E, 結論

水質異常信号発信時にメータ上流の水質との対比を行う場合、比較対照とすべき平常時の管網内水質変動幅や閾値の設定は幾つかの方法で可能であるが、濁度および色度は、極く稀に、水道水質が基準値近傍に達する可能性があることを考慮して、その上限値は水質基準の近傍に設定すべきである。また、事前に、水質異常を発信した給水栓（給水区域）と比較対照とすべき給水栓（給水区域）を設定しておくことが必要である。また、原水の高濁度時の水道水質変動には留意する必要があると考えられた。

#### F, 研究発表

1、論文発表 ;なし

2、学会発表

1) 中村文雄、林武治、服部伍朗; 6 都市における給水系事故発生 of 周期変動性・気温依存性、第 57 回全国水道研究発表会講演集、2006・5、6・14、488~489

2) 中村文雄、若松享二、給水末端システムの維持管理に関する一考察、第 58 回全国水道研究発表会講演集、6・1、pp442-443(2007)

#### G, 知的所有権の取得状況 ;なし

#### 参考文献

1) 中村文雄、水道水質の変動と水質監視・管理への補完的活用に関する検討「Ⅰ」、給水末端における水質および給水装置・機能の異常監視と管理に関する研究、平成 17 年度総括・分担研究報告書、pp25-49 (2006,3)

2) 中村文雄、水道水質の変動と水質監視・管理への補完的活用に関する検討「Ⅱ」、給水末端における水質および給水装置・機能の異常監視と管理に関する研究、平成 18 年度総括・分担研究報告書、pp29-55 (2007,3)

## 資料-4 振動・音等異常現象の検出システムの構築とその実用化

分担研究者 杉山 俊幸 山梨大学工学部

### 1. 研究要旨

一般家屋内での給水管の振動・音の特性を表示できる物理量を抽出し、平常時（水撃作用が生じていない時）と比較して、これらの物理量があらかじめ設定した閾値を越えた場合に、「水撃作用の発生」という警告を発するような装置の開発を試みた。そして、ファジイ判定システムを適用した水撃作用発生の有無を検知する装置の開発に際して収録すべきデータの種類と項目を明らかにし、専門家がいなくても水撃作用の発生を知らせることが可能なファジイ判定プログラムを構築した。最終的に小型で低価格の検出装置を開発し、その精度を確認するまでには至らなかったが、どのようなパーツを組み合わせれば装置ができるのかを提案することができた。

### 2. 研究概要

#### A. 目的

一般家屋内での水撃作用の発生を比較的簡単に検知できる方法、具体的には、給水管の振動・音の継続時間や減衰性状、および、スペクトル解析の実施により振動・音の卓越周波数やスペクトルのピーク値、位相差分スペクトル等を算出し、平常時と比較して、これらの値があらかじめ設定した閾値を越えた場合に、水撃作用発生の警告を利用者に発するような装置の開発を試みる。

#### B. 研究方法

実験室内に一般家屋を想定してスチール製、塩化ビニル製、ポリエチレン製の給水管を配置し、電磁弁により給水を急閉止する際に生じる音、および、給水管の振動のデータを収録する（図1、図2）。また、一般家屋において全自動洗濯機にセットされている電磁弁で給水を急閉止することにより発生する音（i.e. 水撃作用に伴って生じる音）のデータを収録し解析することを試みる。さらに、ハンマーで与えた衝撃による給水管近傍の振動および音の収録・解析も行い、水撃作用発生時とハンマーで与えた衝撃との波動特性の違いから、水撃作用が発生しているか否かを、ファジイ演算を用いて判定するシステムの構築を試みる。そして、給水管の材質を考慮する必要性の有無を判断し、必要有りの場合には、給水管の材質を識別するルールを設定した後に、水撃作用発生の有無を知らせるプログラムの開発を行うことにする。なお、ファジイ演算に用いる評価項目として、図3に示す卓越周波数、減衰定数、継続時間、位相差の割合、最大振幅の5項目を最終的に抽出している。

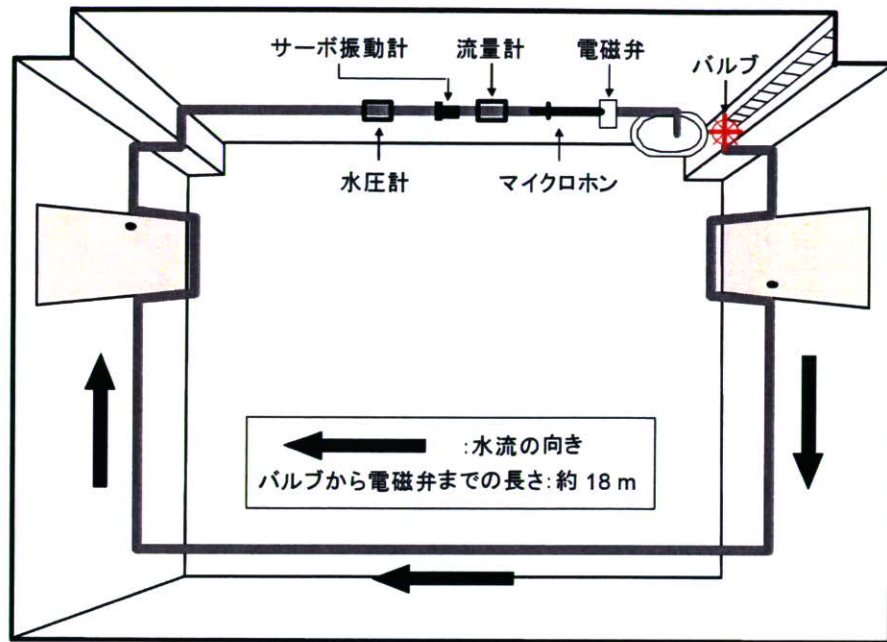


図 1 実験室内管路図

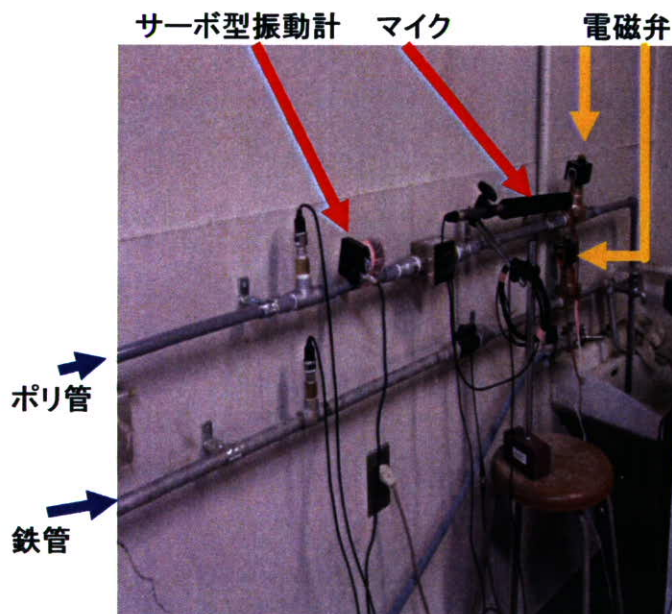
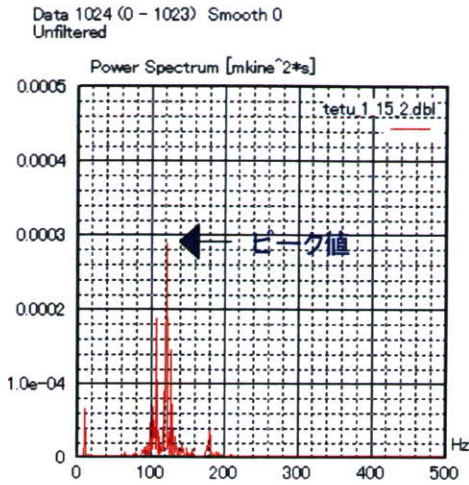
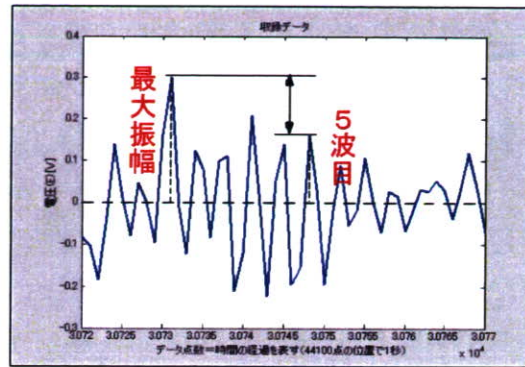


図 2 実験室内の配管等の状況

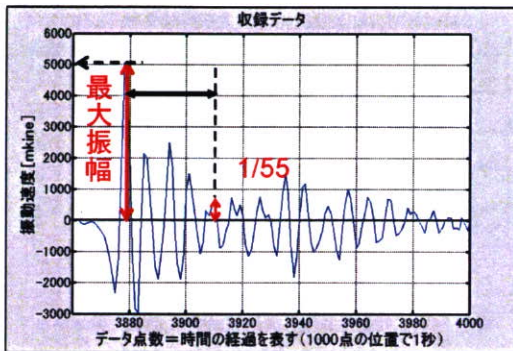
### 〈卓越振動数〉



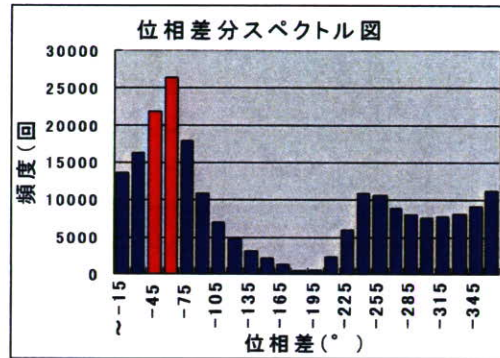
### 〈減衰定数〉



### 〈継続時間〉



### 〈位相差の割合〉



### 〈最大振幅〉

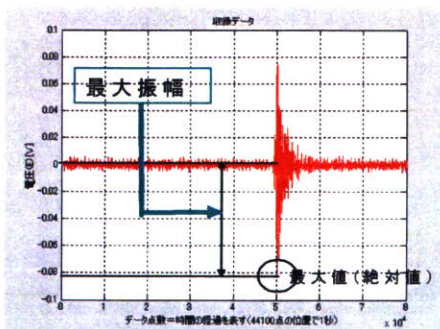


図3 ファジィ演算に用いる5つの評価項目

## C. 研究成果

### 1) 平成17年度の研究成果の概要

一般家屋において全自動洗濯機にセットされている電磁弁で給水を急閉止することにより発生する音(水撃作用に伴って生じる音)のデータを収録し解析することを試みた。ま



た、ハンマーで与えた衝撃による給水管近傍の音の収録・解析も行い、水撃作用発生時とハンマーで与えた衝撃との音の特性の違いから、水撃作用が発生しているか否かを、ファジィ演算を用いて判定するシステムの構築を試みた。その結果、以下の結論が得られた。

- ①住宅Aで発生する水撃作用による音を収録・解析し、これらのデータに基づきメンバーシップ関数を作成しファジィ判定を行った結果、約9割の精度で水撃作用の発生の有無を判定できた（表1）。
- ②作成したファジィ判定システムを用いて住宅A以外の3軒の住宅で収録したデータに対して判定を試みたところ、その判定精度は約7割であった。精度が低下した原因として、各住宅で発生する水撃音にはそれぞれ違いがあり、住宅Aのデータだけを基に作成した判定システムでは十分な判定精度が得られないものと考えられる（表2）。
- ③住宅Aでの実験での結果、評価項目の1つである「最大振幅」は流量に影響を受けやすいことが明らかとなった。住宅Aの実測データのみに基づく判断になるが、一般家庭に供給される流量は、時間帯・建物の階数等でそれぞれ異なってくるため、変動が大きい項目であると考えられる。

表1 住宅Aでの収録データに適用した場合の判定結果

判定	水撃作用	ハンマーによる衝撃
水撃作用検出	42	0
発生の可能性あり	2	0
発生せず	6	55
	計50データ	計55データ

表2 住宅A以外の3軒での収録データに適用した場合の判定結果

判定	住宅B	住宅C	住宅D
水撃作用検出	2	2	7
発生の可能性あり	1	2	2
発生せず	0	0	0
	計3データ	計4データ	計9データ

## 2)平成18年度の研究成果の概要

実験室内で給水管の振動と音を同時に計測し、両者のデータを用いて水撃作用が発生しているか否かをファジィ演算に基づいて判定するシステムを構築すること、および、スチール製給水管を塩化ビニル製給水管に変更した場合の水撃現象発生時の振動および音の特性を把握するための実験を実施し、給水管の材質の違いがファジィ演算を用いた水撃作用検知システムに及ぼす影響について検討することを試みた。その結果、以下の結論が得られた。

- ①スチール製給水管と塩化ビニル管の速度振動波形の特性が大きく異なることから、ファジィ判定システムに組み込む要因（評価項目）の1つである継続時間を、前者に関しては最大振幅の1/5の振幅が生じるまでの時間とし、後者に関しては最大振幅の1/18の振幅が生じるまでの時間とした結果、評価基準がまとまりのあるものになった（図4）。

- ②評価項目については、音・振動ともに「継続時間」および「位相差の割合」とし、「位相差の割合」に重みをおいて判定を行った結果、音と振動（振動計測を電磁弁から 80cm と 280cm の位置で実施）の両者を対象としたときの判定結果の精度は、スチール製給水管については、水撃作用検出に対して 87.5%，水撃作用以外の衝撃の検出に対して 100%であり、塩化ビニル製給水管については、水撃作用検出に対して 87.5%，水撃作用以外の衝撃の検出に対して 91.7%であった（表 3）。
- ③水撃作用の検出に際しては、給水管の材質を考慮してファジイ演算プログラムを構築する必要がある。
- ④水撃作用検出用のファジイ演算を構築する場合には、音と振動の両者を対象とするのが望ましいが、一方しか採用しない場合には、特に塩化ビニル製の場合、電磁弁にできる限り近い位置での給水管の振動を対象とするのが適切である。

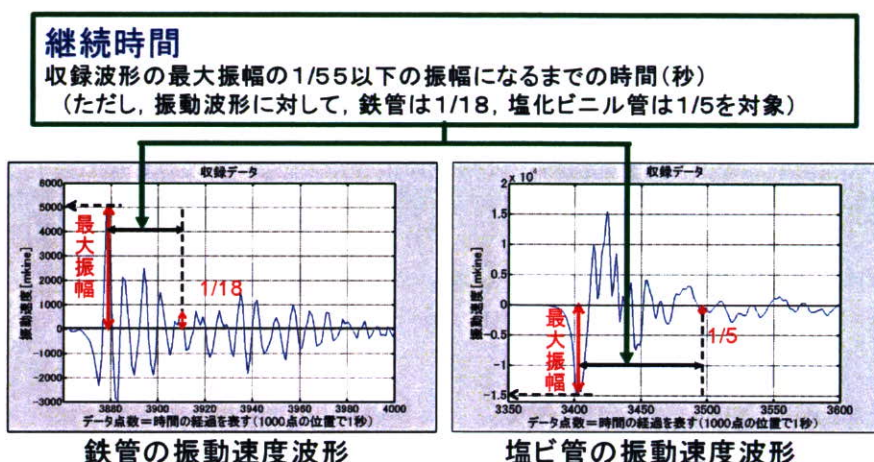


図 4 評価項目としての継続時間の設定方法

表 3 水撃作用検出の精度 ( ) 内は、正しく判定できた回数/総データ数 を表示

		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
鉄管	水撃作用の検出割合	87.5% (7/8)	87.5% (7/8)	87.5% (7/8)	75% (6/8)	75% (6/8)
	水撃作用以外の衝撃の検出割合	100% (12/12)	30% (4/12)	100% (12/12)	100% (12/12)	100% (12/12)
塩ビ管	水撃作用の検出割合	87.5% (7/8)	87.5% (7/8)	87.5% (7/8)	87.5% (7/8)	50% (4/8)
	水撃作用以外の衝撃の検出割合	91.7% (11/12)	58.3% (7/12)	91.7% (11/12)	100% (12/12)	75% (9/12)

- (A)音と振動（振動計測を電磁弁から 80cm と 280cm の位置で実施），(B)音のみを対象  
 (C)振動のみを対象（振動計測を電磁弁から 80cm と 280cm の位置で実施），  
 (D)音と振動（振動計測を電磁弁から 80cm の位置で実施），  
 (E)音と振動（振動計測を電磁弁から 280cm の位置で実施）



### 3)平成 19 年度の研究成果の概要

最近多用され始めている架橋ポリエチレン管を給水管として用いた場合の水撃作用発生時の振動および音の両者を実験室内で収録し、給水管の材質が不明の場合でも水撃作用の発生が検出可能なシステムの構築を目的とした。そして、「小型化」、「低価格化」を意識した検知装置の開発の方向性について検討を行い、実用化に向けた提案をすることを試みた。その結果、以下の結論が得られた。

- ①給水管の材質を識別するためのフローチャートを作成し(図 5)、これに基づいて収録したデータを対象に識別を実施した結果、その精度は、鉄管について 100%、塩化ビニル管について 100%、ポリエチレン管 1(流量 17L/min)について 100%、ポリエチレン管 2(流量 17L/min)について 100%、ポリエチレン管 3(流量 17L/min)について 88.9%であった(図 6)。ポリエチレン管については、流量を限定する識別方法となったが、全体的に高い精度のものになっている。
- ②ファジィ判定項目を、音では「継続時間」「位相差の割合」、振動では「減衰定数」「位相差の割合」とし、音と振動ともに「位相差の割合」に重みをおいて判定を行った結果、音と振動を対象としたときの判定結果の精度は、鉄管については水撃作用検出に対して 100%、水撃作用以外の衝撃の検出に対して 91.7%であり、ポリエチレン管の水撃作用検出に対しては、ポリエチレン管 1で 83.3%、ポリエチレン管 2で 100%、ポリエチレン管 3で 100%であった。「水撃作用が発生しているか否か」の判定システムを構築することができ、80%以上の判定精度が得られている(図 7)。
- ③鉄管、ポリエチレン管ともに音と振動を対象とした水撃作用発生の有無の検出精度が最も高くなっている(表 4)。

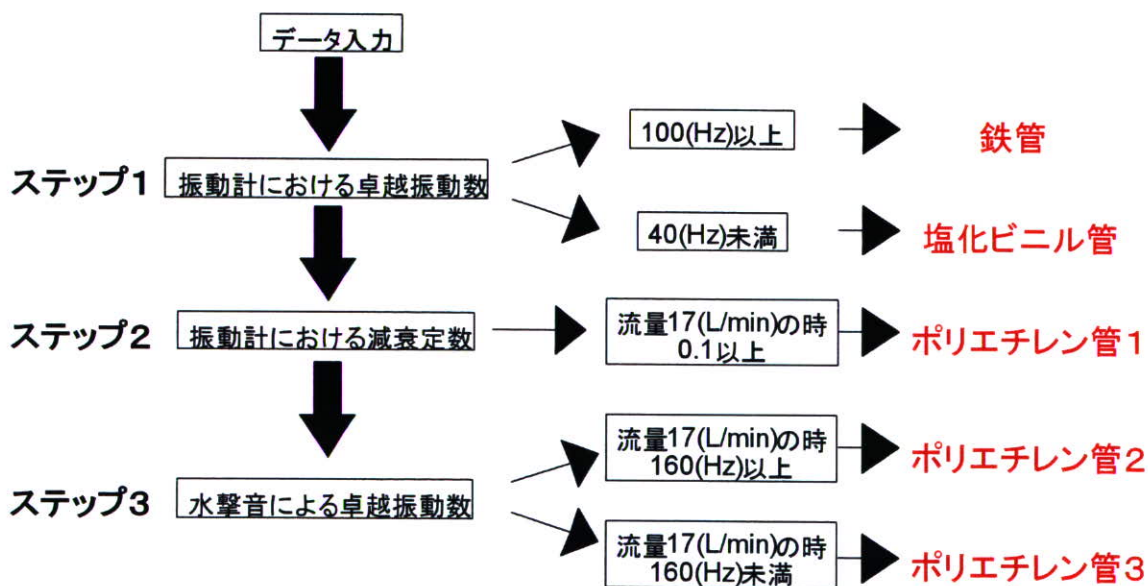


図 5 識別フローチャート

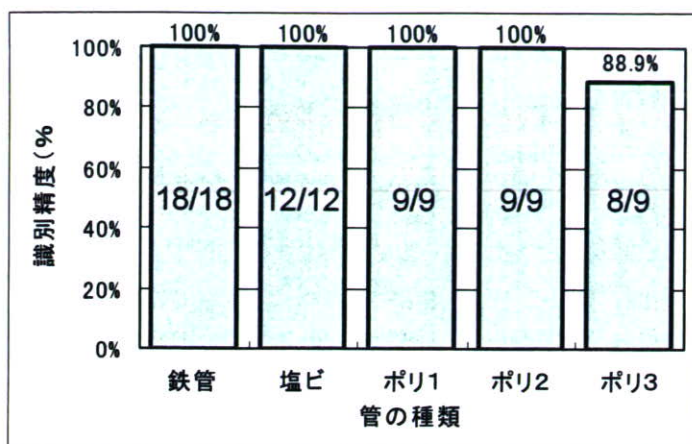


図 6 給水管の材質の識別結果

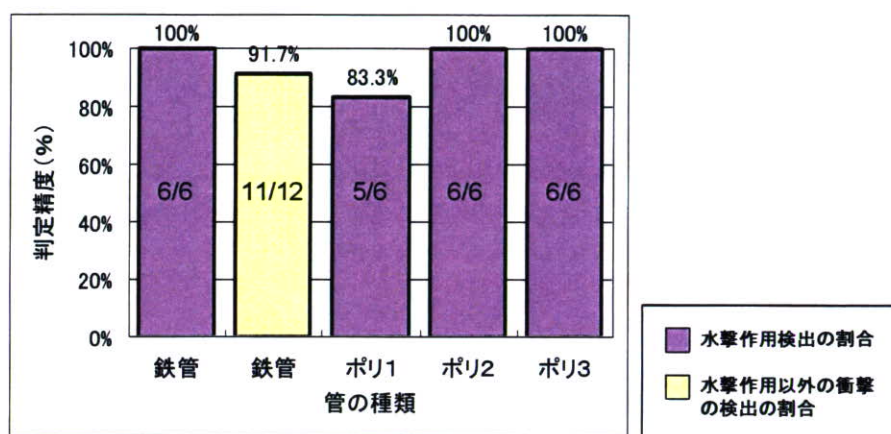


図 7 構築した水撃作用発生検知システムの精度

表 4 各データ判定の精度

		(1)	(2)	(3)
鉄管	水撃作用検出の割合	100% (6/6)	100% (6/6)	100% (6/6)
	水撃作用以外の衝撃の検出	66.7% (8/12)	91.7% (11/12)	91.7% (11/12)
ポリエチレン管1	水撃作用検出の割合	83.3% (5/6)	83.3% (5/6)	83.3% (5/6)
ポリエチレン管2	水撃作用検出の割合	100% (6/6)	83.3% (5/6)	100% (6/6)
ポリエチレン管3	水撃作用検出の割合	100% (6/6)	83.3% (5/6)	100% (6/6)

- (1)音のみを対象としたときの判定      (2)振動のみを対象としたときの判定  
 (3)音と振動の両方を対象としたときの判定

## D. 考察

一般家屋内での水撃作用の発生を比較的簡単に検知できるシステムを開発するためには、給水管の材質が何かを考慮しながらファジイ判定プログラムを構築する必要がある。また、計測の対象として、水撃作用の発生に伴って生じる音と振動の両者が考えられるが、音のみを対象とする場合には、振動のみを対象とするよりも発生の有無を判定する精度が低い。従って、振動の計測が可能となることを最優先させることが望ましいといえる。

## E. 結論

ファジイ判定システムを適用した水撃作用発生の有無を検知する装置の開発に際して収録すべきデータの種類と項目を明らかにし、専門家がいなくても水撃作用の発生を知らせることが可能なファジイ判定プログラムを構築した。この判定プロセスにおいては、材質が分かっていない給水管に対して、材質の識別を行った後、評価項目を当てはめてファジイ判定を行うという流れで、水撃作用が発生しているか否かを判断している。

最終的に小型で低価格の検出装置を開発し、その精度を確認するまでには至らなかったが、どのようなパーツを組み合わせれば装置ができるのかを提案することができた。30,000 円程度で水撃作用検知システムが製品化できるものと予想している。

## F. 研究発表

1. 論文発表 ; なし

2. 学会発表

1) 杉山俊幸, 川村真彦, 中村文雄, 松本正文: 音を対象としたファジイ理論に基づく水撃作用検知システムの開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集 VII-019, 2006 年 9 月, CD-ROM 版。

2) 杉山俊幸, 原田要, 中村文雄, 松本正文: 音と振動を対象としたファジイ理論に基づく水撃作用検知システムの開発, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集 VII-109, 2007 年 9 月, CD-ROM 版。

G. 知的所有権の取得状況 ; なし

# 資料－5 貯水槽水道における給水管ネットワークの水量異常の 検出方法に関する基礎的研究

分担研究者 長岡 裕 武蔵工業大学工学部

## 1. 研究要旨

水道メータ付近に設置した流量計，圧力計，水質計によって，水質の異常や水量の異常を速やかに検出し，水道利用者に警報を発するシステムの構築を目的とした。貯水槽水道の建物の1階にある実験室内で，漏水の有無の検出可能性を実験的に調べた結果，管路におけるエネルギー損失から計算される係数を逐次計算することにより，漏水の有無を検出できることを示した。特に，流量の小さい層流域において漏水の有無の検出の精度は上昇することを示し，電磁流量計を用いるシステムの導入により，低流量でも精度良く計測することが可能で，本システムの有効性を示した。

## 2. 研究内容

### A. 目的

本研究では，水道メータ付近に設置した流量計，圧力計，水質計によって，水質の異常や水量の異常を速やかに検出し，水道利用者に警報を発するシステムの構築を目指した。想定しているシステムとしては，図1に示すように各戸に各種センサを併設した水道メータを設置し，各種センサから得られる流量データ及び水質データの時系列データを逐次1箇所の管理システムに送ることで，異常が発生した場合，各戸に警報を発するというものである。管理システムでは，流量と圧力の変化や，水質の変化を捉え，それらの変化の傾向から異常を検出し，警報を発する。これにより当該需要者はもちろん，他の需要者に対する健康的リスクの低減や，経済的損失の低減を達成することが可能となる。本研究では，このシステムの構築のために，時系列データから給水管・給水装置に由来する漏水検出方法のアルゴリズム構築と給水管内の水質や水量の変化パターンの把握を目的とする。

### B. 研究方法

#### B.1 実験装置の概要

図1に実験装置概略図を示す。実験装置は本学5階建ての1階の蛇口から塩ビ管を繋ぎ，その塩ビ管に流量計（電磁流量計）と圧力計（デジタル圧力計）を設置し蛇口の使用に伴う流量と圧力を同時に測定できるシステムになっている。各検出器から出力されるデータはA/D変換機を通しアナログデータをデジタルデータに変換し1台のパソコンで連続的に取得できるようにした。



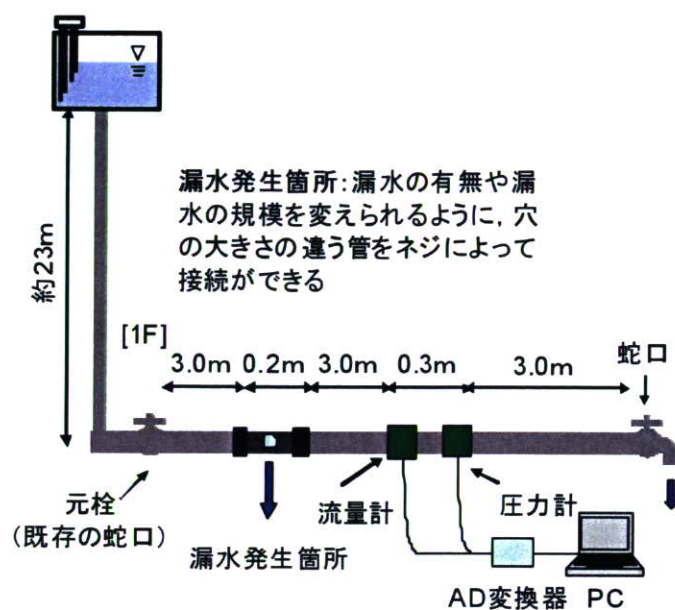


図1 実験装置

## B.2 漏水検出の理論

### B.2.1 管路における摩擦および形状によるエネルギー損失の定式化

高置水槽の水面の高さの差を  $H$  とすれば、蛇口における流速  $v$ 、圧力  $p$ 、高さ  $z$  を用いて、ベルヌーイの式より以下の式が成立する。

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_L = H = \text{const} \quad (1)$$

ここに、 $h_L$  は管路を流れる間の損失水頭である。

損失水頭は摩擦損失と曲がり部や急拡大、急縮などの形状損失によると考えられるので、以下のように、摩擦損失係数  $f$  と形状損失係数  $K$  を用いて表現できる。

$$h_L = \left\{ \frac{1}{2gA^2} \left( f \frac{L}{D} + K \right) \right\} Q^2 \quad (2)$$

ここに、 $A$ : 管の断面積、 $D$ : 管の直径、 $Q$ : 蛇口における流量である。

ここで、下に示す損失係数  $\lambda$  を定義する。

$$\lambda = \frac{1}{2gA^2} \left( f \frac{L}{D} + K \right) \quad (3)$$

$\lambda$  は、摩擦損失と形状損失に依存する係数であるが、本研究では、特に層流領域における現象に着目するが、摩擦損失係数  $f$  は層流領域では以下の式で表されることが知られている。

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4)$$

ここに Re は蛇口における流速と直径から計算されるレイノルズ数である。

従って、仮に形状損失係数 K を無視できるとして、 $\lambda$  を (5) 式で表現すれば、係数  $\alpha$  は、(6) で示すとおり、管路の長さ $L$ と直径 $D$ に依存する管路に特有の値を示すことになる。

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \alpha \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 g A^2} \frac{L}{D} \quad (6)$$

### B.2.2 漏水の有無の検出の理論

係数  $\alpha$  は (6) 式で示すとおり、管路の形状のみによる値であり、漏水の有無により変化するものではないが、漏水の有無がもたらす蛇口における流量と実際に管路を流れる流量との差により、見かけ上蛇口部におけるレイノルズ数に対して値が変化することになる。

今、蛇口における流量を  $Q$ 、蛇口付近における漏水量を  $q$  とすると、蛇口における流量が  $Q$  であっても、漏水の無い場合は管路内の流量は  $Q$ 、漏水のある場合の流量は  $Q+q$  となる。従って、蛇口で観測されるレイノルズ数が等しくても、(1) 式より計算される摩擦損失水頭は漏水があるほうが大きくなり、その結果 (7) 式で計算される観測された  $\lambda$  の値は大きくなる。

$$\lambda = \frac{h_L}{Q^2} \quad (7)$$

以上より、蛇口において流量および圧力を測定しながら係数  $\alpha$  を計算し、漏水などの状況を監視することが可能であると考えられる。

### B.2.3 数値シミュレーションの方法

図3で示した結果を理論的に解析することを目的とし、図4のような配管モデルを考え、2階～5階でランダムに水道を使用している状況を考慮し、 $\alpha$  の値の変化のシミュレートを試みた。各階の水道の使用量は1階と同様にランダムに変動するとした。

表1にシミュレーションにおいて設定したパラメータ値をまとめて示す。蛇口からの流量は表に示された値の間でランダムな値を設定するものとした。

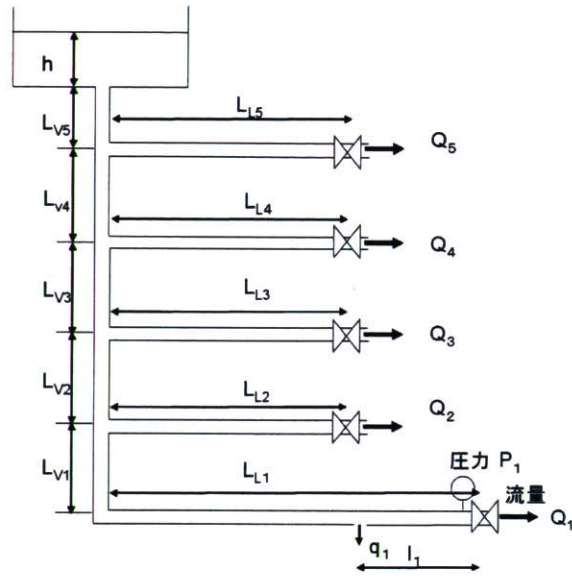


図4 建物内配管モデル

表1 シミュレーションにおいて設定したパラメータ値

動粘性係数: $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) 0.000001003	パイプの長さ: $L_{L1}$ (m) $L_{L1}= 4.6$	パイプの長さ: $L_{V1}$ (m) $L_{V1}= 9.5$	流量: $Q_1$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) $Q_1= 0-0.09$
管径: $d_1$ (m) 0.015	パイプの長さ: $L_{L2}$ (m) $L_{L2}= 4.6$	パイプの長さ: $L_{V2}$ (m) $L_{V2}= 9.5$	流量: $Q_2$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) $Q_2= 0-0.05$
断面積: $A$ ( $\text{m}^2$ ) 0.000176625	パイプの長さ: $L_{L3}$ (m) $L_{L3}= 4.6$	パイプの長さ: $L_{V3}$ (m) $L_{V3}= 9.5$	流量: $Q_3$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) $Q_3= 0-0.05$
形状損失係数 $k$ 260	パイプの長さ: $L_{L4}$ (m) $L_{L4}= 4.6$	パイプの長さ: $L_{V4}$ (m) $L_{V4}= 9.5$	流量: $Q_4$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) $Q_4= 0-0.05$
漏水量 $q$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 0.002	パイプの長さ: $L_{L5}$ (m) $L_{L5}= 4.6$	パイプの長さ: $L_{V5}$ (m) $L_{V5}= 9.5$	流量: $Q_5$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) $Q_5= 0-0.05$
漏水量 $q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 5.55556E-07	パイプの長さ: $l_1$ (m) 6.5		

### C. 研究結果

#### 1) 平成17年度の研究結果

3種類の漏水条件を設定し、実験を行った（図5に各条件における蛇口からの流量と漏水流量との関係を示す）。

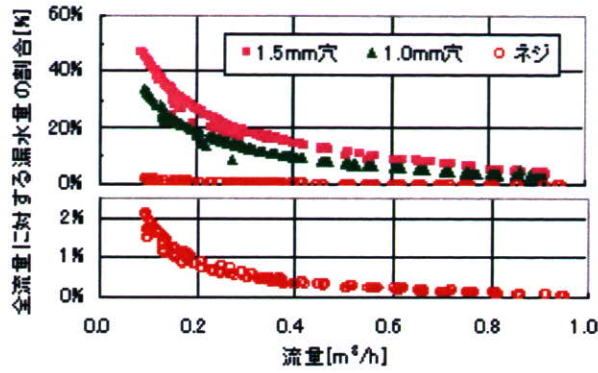


図5 末端流量と全流量に占める漏水量の割合の関係

図6および図7は、蛇口におけるレイノルズ数と計算された損失水頭係数 $\lambda$ の平均値および変動の標準偏差である。漏水があることにより、損失水頭係数 $\lambda$ の平均値および変動の標準偏差ともに大きくなっており、本手法により漏水の検出が可能であることが示された。

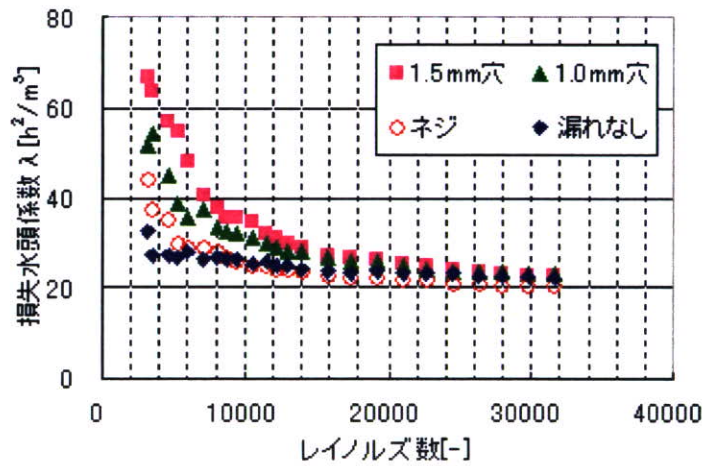


図6 損失水頭係数 $\lambda$  (平均値)とレイノルズ数の関係



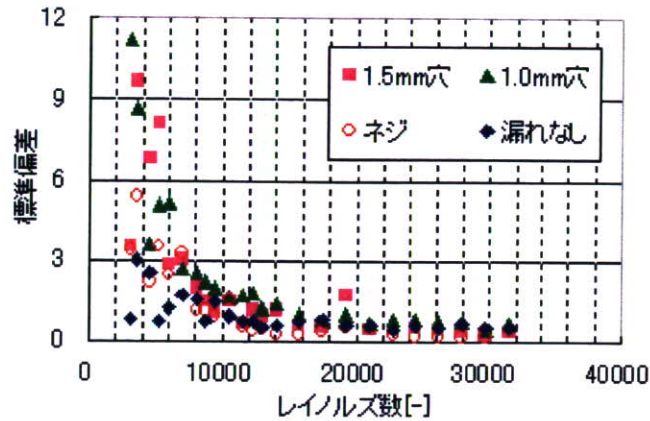


図7 損失水頭係数λの標準偏差とレイノルズ数の関係

図8、図9、図10は、流量区分ごとの損失水頭係数λの平均値と標準偏差を算出し、この確率密度関数を求めたものである。末端流量が増えると正規分布の形は平均値を中心に尖った傾向になり、末端流量が減ると裾野の広い分布になる傾向がわかる。また、漏水量割合が高くなる末端流量（0.4m<sup>3</sup>/h未満）の範囲では、漏れの程度が大きくなるにつれ、平均値が大きくなり、分布の幅が広くなることがわかる。この傾向は、大部分の流量区分でも同様である。ただし、ネジを挿した状態では、末端流量が多いときには、漏れの無い状態より、分布の幅が狭くなっていることが分かる。

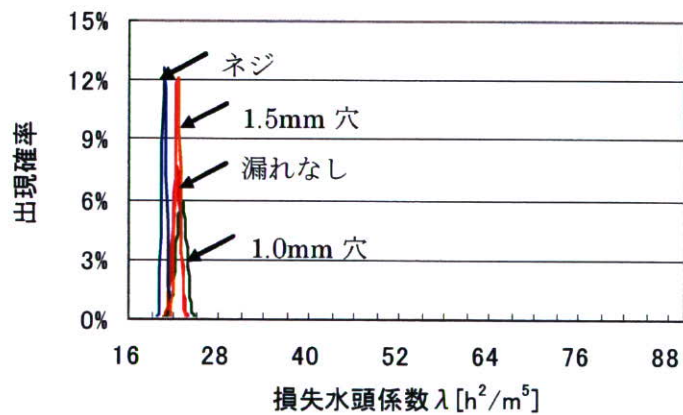


図8 流量区分0.9 m<sup>3</sup>/hにおける正規分布

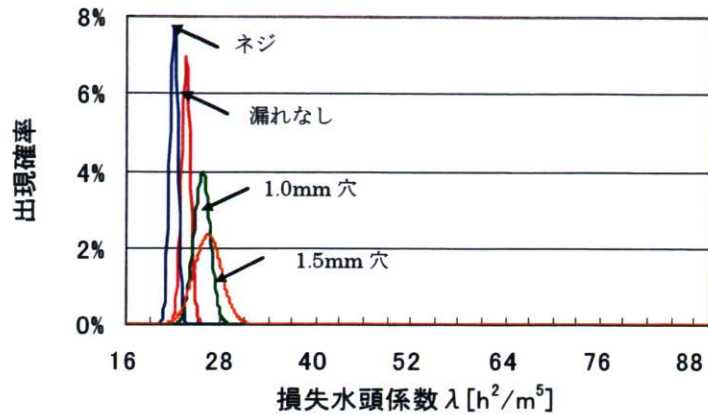


図9 流量区分0.55 m<sup>3</sup>/hにおける正規分布

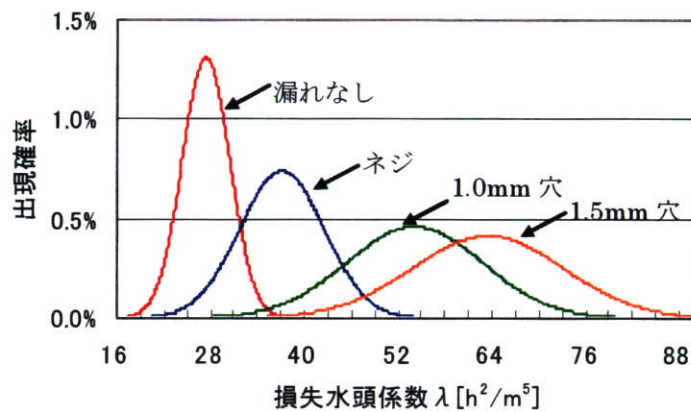


図10 流量区分 0.1m<sup>3</sup>/h における正規分布

## 2) 平成 18 年度の研究成果の概要

平成 18 年度は漏水検出の感度の良い小流量（層流域）において、少量の漏水の検出の可能性を実験的に調査した。漏水流量と蛇口からの流量の関係は図 11 のとおりである。

実験結果を図 12 に示す。α の値は中途階における水使用や高置水槽の水位変動によりばらつきを示すが、漏水の有無により平均的な値には差があることが示され、小流量の漏水についても、蛇口からの流量が小さい領域であれば、漏水を検出可能であることが示された。

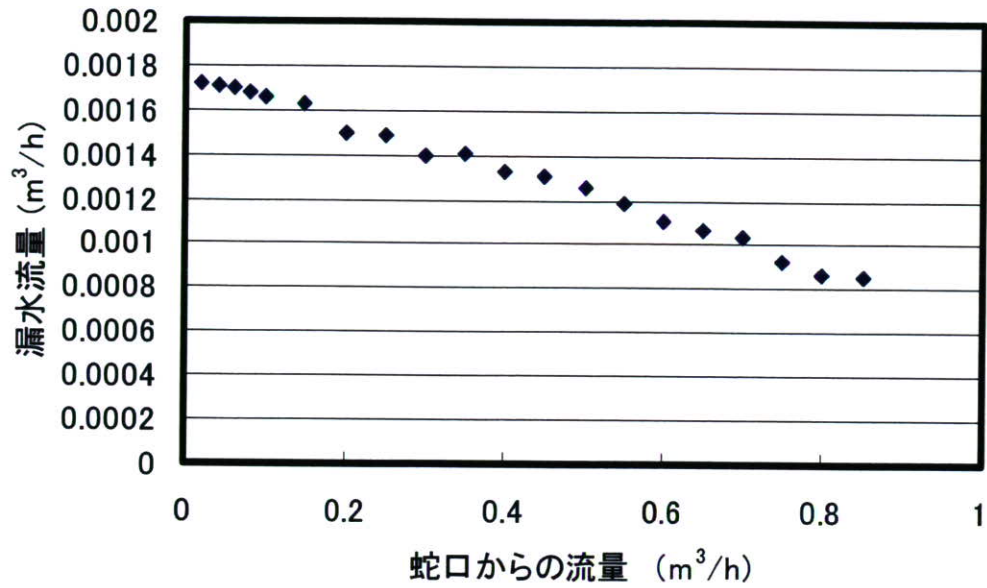


図 11 漏水量と流量の関係

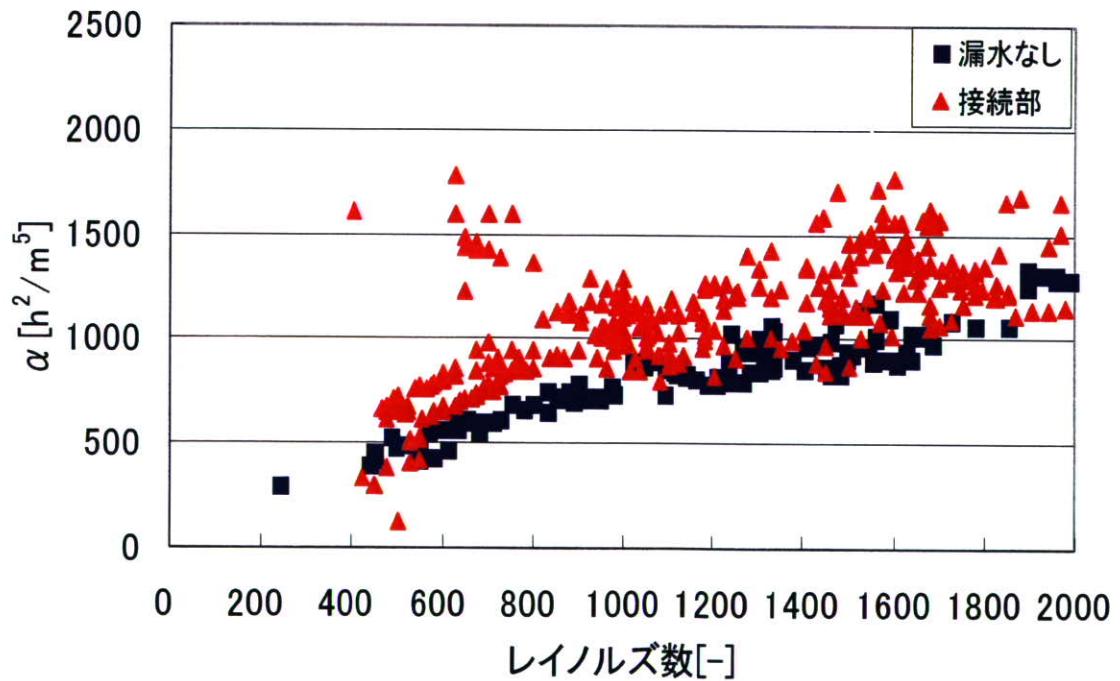


図 12 蛇口からの流れのレイノルズ数と係数  $\alpha$  との関係

### 3) 平成 19 年度の研究成果の概要

レイノルズ数が小さい条件、すなわち蛇口からの流量が小さい条件で、漏水の有無により管内流量の差が大きく、漏水の検出の制度が上がると考えられるため、蛇口か

らの流量は小さい条件を設定し、管内レイノルズ数が 2000 未満の層流の条件を設定した。各階の水道利用はランダムなため、たとえ 1 階におけるレイノルズ数が層流でも途中の段階で乱流となることが十分予想されるが、ここでは簡単のため、各階の水道使用量も小さく、全階において流れが層流であると仮定した。

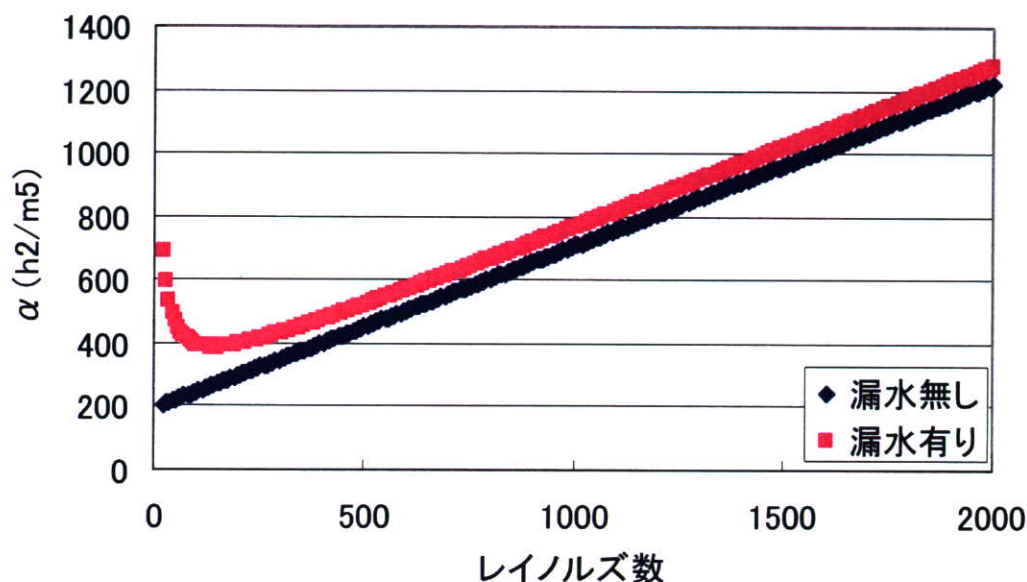


図 13 1 階のみで蛇口を使用していると仮定したときの係数  $\alpha$  と蛇口におけるレイノルズ数との関係

図 13 に 1 階のみで蛇口を使用していると仮定したときの係数  $\alpha$  と蛇口におけるレイノルズ数との関係を示す。形状損失係数  $K$  を無視できないとして仮定しているため、レイノルズ数の上昇にともない、係数  $\alpha$  の値が上昇している。また、レイノルズ数が極めて小さい領域において、漏水の有無の差が大きくなる様子が示されている。

2 階～5 階においてランダムに蛇口の仕様をしたと仮定した計算結果を図 6 に示す。レイノルズ数と  $\alpha$  の関係を計算した結果を図 14 に示す。各階での水の使用により係数  $\alpha$  が変動することは再現され、漏水の有無によって  $\alpha$  の値に差が生じることも再現された。実験結果の図 3 と比較すると、漏水の有無による差がやや小さくなっており、実験結果を完全に再現することはできなかった。これは各階における水道使用や高置水槽における水位変動などをシミュレーションにおいては完全に再現できなかったことによると考えられる。しかしながら、平成 18 年度研究図 12 で示したような係数  $\alpha$  のばらつきと漏水の有無による変化が理論的に説明ができたことにより、本手法の漏水検知としての妥当性が示されたと考えられた。