

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04662

研究課題名（和文）光ファイバセンサを用いたろ過膜の完全性を常時監視可能な新規手法の開発研究

研究課題名（英文）Development of a novel membrane integrity testing method by continuous monitoring using optical fiber sensors.

研究代表者

橋本 崇史（HASHIMOTO, Takashi）

東京大学・先端科学技術研究センター・講師

研究者番号：80735712

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光ファイバ型圧力センサを応用したろ過膜モジュール内の圧力分布の計測に基づき膜破断時の圧力変化を捉えることによる新規の膜異常検知手法を開発し、膜モジュール内の膜破断検知とその位置特定が可能となることを実証した。数値流体力学による解析と実験的検証との併用により、従来手法では破断膜における短絡流量が過大評価されていること、また膜ろ過流量は無視できないことを明らかにした。さらに、破断していない劣化膜の性能低下は、膜内部の流路の最小径が大きくなることで引き起こされている可能性を示した。また、膜ろ過施設の膜破断データに統計モデルを応用することで膜交換時期を推定する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまでオンラインでの監視が困難とされきた膜ろ過施設稼働中のろ過膜の破断について、光ファイバセンサを応用することで常時監視できる可能性を提示し、また浄水処理分野において光ファイバセンサの応用可能性を示した。また、破断膜における流れ、膜内部の多孔質構造における流れ現象を数値流体力学を用いた解析により明らかにし、中空糸ろ過膜における流動および阻止機構の解明に資する知見を得た。構築したろ過膜の異常検知予測モデルに基づく膜交換時期推定手法を提案し、現場での応用可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：A novel membrane integrity-testing method was developed based on monitoring the pressure change inside a membrane module induced by the membrane failure by optical fiber sensor. It was demonstrated that the developed method could detect and identify the location of the membrane failure in a module. The computational fluid dynamics (CFD) analysis and the experimental investigation of a failed hollow fiber membrane revealed that the short-cut flow rate in a failed membrane was overestimated by the conventional method and the filtration flow is not negligible. Furthermore, it was shown that the performance degradation of aged membranes may be caused by the increase in the minimum diameter of the flow path inside the membrane.

A novel method for estimating membrane replacement timing was proposed by applying a stochastic process model to membrane failure data obtained from a membrane filtration plant.

研究分野：環境工学

キーワード：浄水処理 膜ろ過 異常検知 光ファイバセンサ 数値流体力学 確率過程 予測モデル 膜劣化

1. 研究開始当初の背景

浄水施設の維持管理は水道水の安全性を直接的に影響する。膜ろ過浄水システムは維持管理が簡便性や処理水質の安定性等の特徴を有するが、一方で、ろ過膜の劣化による損傷や破断がろ過水質の悪化や膜交換頻度の増大を招き、安全な水の持続的な供給のリスクとなっている。特に多くの浄水施設で採用されている中空糸膜は経年劣化により膜の破断や損傷が起りやすいため、処理水の安全性の確保が課題である。一般に、膜ろ過浄水場では、このような膜の損傷や破断を検知するために膜損傷検知(以下、完全性試験)を行っている。直接法による完全性試験は、膜損傷の検出精度は高いが、膜ろ過運転を停止する必要性から常時実施できないという問題があり、間接法は膜損傷の検出精度が低いという問題がある。また、破断が検知されるまでは、破断膜から原水が処理水側へ流出し、処理水を汚染し続ける、という問題がある。そのため、“途切れることなく”連続的に安全性の確保が可能となるような新たな膜損傷をモニタリングする手法が必要である。

近年、社会インフラの老朽化が広く懸念されており、そのメンテナンス手法として、光ファイバセンサを用いた技術が注目されている。光ファイバは、細径かつ軽量で、電磁雑音下での安定計測が可能、長距離に渡る計測が可能、電源不要という長所を有しており、近年トンネルや橋梁、パイプライン水道用配管等のインフラのヘルスマニタリング手法として適用が検討されている。光ファイバセンサは、ファイバに沿った歪みや温度、圧力負荷などの物理量の分布を高感度かつ高精度、すなわち高い空間分解能で遠隔測定できる利点がある。本研究では、この光ファイバセンサを、膜ろ過浄水処理システムの新しい完全性モニタリング手法へ応用することを考える。

モジュール内には流量の分布があり、膜が破断すると流動が変化する。その変化を光ファイバ型圧力センサでモニタリングするには、膜破断による流動の変化に起因する圧力変化の検出感度、センサの最適配置の検証、また得られた圧力データから水理学的に流動を算出するモデルの構築が必要である。また申請者の研究から、破断には至らない劣化の進行により膜の微粒子阻止性が低下することが分かっている。このような破断に至らない劣化の進行に関しては流動の変化が微小のため、検知は困難であり、別に感度の高いモニタリング方法が必要である。間接法である微粒子計数法は、数個/mLの高感度を持つが、総粒子数による異常検知のアラームとしてしか利用されておらず、粒径分布など計測情報に活用余地があることから、より高感度な完全性試験方法が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、広く普及している中空糸ろ過膜を用いた膜ろ過浄水システムにおいて、“途切れることなく”処理水の安全性をモニタリング可能な、新しい完全性試験方法を確立することを目指し、光ファイバセンサを用いて中空糸膜モジュール内の流動をモニタリングすることによる膜モジュール内の中空糸膜の劣化進行及び損傷の新規検知方法の開発と、膜ろ過水中の微粒子数の分布と時系列データ解析を用いた高感度な完全性モニタリング手法の開発、および適切な膜交換時期を推定するための膜破断データ解析手法の開発を目的とした。

3. 研究の方法

1) 光ファイバ型圧力センサによるろ過膜破断検知手法の実験的検証

膜破断によるろ過膜モジュール内の圧力分布の変化を捉えるため、FiberBraggGrating (FBG)を用いた光ファイバ型圧力センサを、定流量・デッドエンド方式の模擬膜モジュール内に長手方向に多点設置し、ろ過膜の破断本数を増やしていき、破断本数と圧力分布との関係を実験的に調査し、ろ過運転中の膜ハウジング内部の圧力分布の変化を測定することで、膜の損傷(破断)を検知することができるかどうかを検証した。光ファイバ型圧力センサによる測定精度を検証するため、従来式の圧力センサをモジュールの前後に設置し、モジュール間差圧を測定した。

2) 数値流体力学および実験を用いた破断した中空糸膜および破断に至っていない劣化膜における流れおよび粒子阻止性能の解析

破断した中空糸ろ過膜における短絡流量と膜ろ過流量を定量的に評価するため、膜の公称孔径(0.1 μ m)より十分大きい微粒子を純水に分散させた溶液を破断膜を用いてろ過し、膜面に堆積した微粒子数が膜透過流量に比例することを利用して膜透過流量を推定した。膜面に堆積した微粒子計数は、膜面のSEM観察画像にOpenCVのHough変換アルゴリズムを適用することで行った。同様に、透過水側に漏出した微粒子はすべて短絡流に由来することから、膜ろ過原水およびろ過水中の微粒子濃度の比を捉えることで、短絡流量を推定した。

破断に至っていない劣化膜について、バブルポイント圧力および拡散空気量の2種の気体透過性と、細菌大および塩素耐性を持つクリプトスポリジウム大の微粒子の阻止性能との関係性を明らかにし、気体透過性試験による微粒子阻止性能劣化の推定可能性を評価した。

有限体積法に基づく数値流体力学を用いて、破断した中空糸膜における短絡流量および膜透過流量を解析し、破断膜の粒子阻止性能を評価した。また膜内部の流路構造と流れとの関係性について、数値流体力学的解析を用いて定量的に評価した。

3) 統計モデルを用いた破断予測と膜交換時期予測

ろ過膜の適切な交換時期を推定するため、各膜ろ過浄水施設に固有な情報である異常検知データに対して非定常ポアソン過程に基づく統計モデルを用いて将来の異常検知数の予測モデルを構築した。

4. 研究成果

1) 光ファイバ型圧力センサによるろ過膜破断検知手法の実験的検証

膜破断による膜モジュール内の流動の変化による圧力変化に基づき、膜モジュール前後の圧力差(膜差圧)の変化を従来式の圧力計で計測し、破断検知可能性を検討したところ、破断による膜差圧の変化を捉えることが可能であることが示された。一方で、ハーゲンポアズイコ流れを仮定した破断膜における短絡流量を考慮したモジュール間差圧の変化とは違いが見られたことから、破断膜における流れの仮定が誤っている可能性が示された。

光ファイバ型圧力センサを模擬膜モジュール内に多点配置し、モジュール内圧力をモニタリングすることにより、膜モジュール内の圧力分布をとらえることができた。さらに、ろ過膜の破断の有無、および破断位置を特定できる可能性を示した(図 1)。これらより、膜モジュール内の圧力分布をモニタリングすることにより、オンラインで膜破断検知、および破断位置の特定が可能となることが示された。

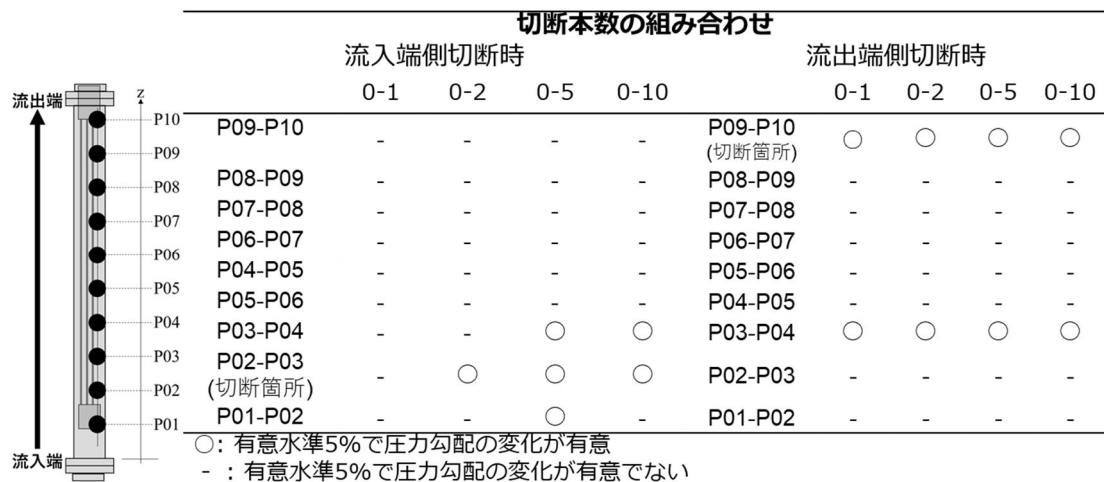


図 1 光ファイバ型圧力センサによる膜破断および破断位置推定 (名本ら 2019 より一部改変)

2) 数値流体力学および実験を用いた破断した中空系膜および破断に至っていない劣化膜における流れおよび粒子阻止性能の解析

破断した膜における短絡流量と膜透過流量を、実験および数値流体力学により解析した結果、既往研究で無視できると仮定されていた破断膜の膜透過流量は無視できないことが示された(図 2)。推定方法によるばらつきはあるものの、10%程度の誤差のもとで膜内流量を定量評価できた。実験値に基づく破断膜の粒子阻止性能はおおむね $0.10 \log_{10}$ 程度であった。膜内流量モデルに基づく数値解析から得られた破断膜の粒子阻止性能が $0.10 \log_{10}$ であったことから、本モデルを用いて精度よく破断膜の粒子阻止性能を評価できることが示された。

破断膜における膜透過流量を考慮した膜モジュールにおける許容膜破断率は、破断位置により異なり、モジュールの流入端で破断した場合に顕著に許容可能な破断率が大きくなることを示された。

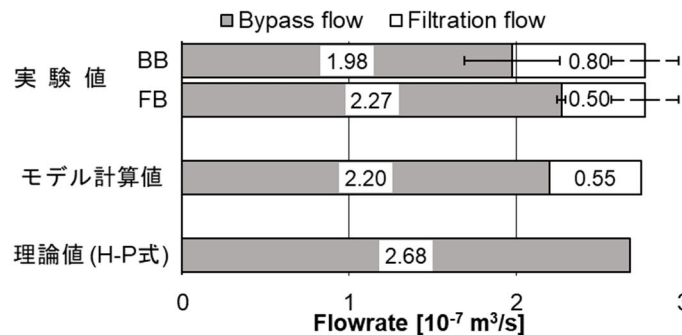


図 2 破断膜の膜内流量の内訳 (名本ら 2021 より)

破断に至っていない劣化したる過膜におけるバブルポイント圧力および気体流量と微粒子阻止性能との関係を実験的に調べ、浄水施設で容易に測定可能な気体透過性の変化から膜劣化による阻止性能の低下を推定可能であることを示した(図3)。

膜内部の流路内での流れの解析から、流路の細い部分で流路内の流速は大きくなっており、圧力損失も大きかった(図2)。流路において最も細い部分の流路幅(最小径)が小さいほど流量が小さくなる関係が明らかになり、様々な形状の流路を有する多孔質構造の膜では、流路内での最小径が流量を規定する重要な因子であることが示された。

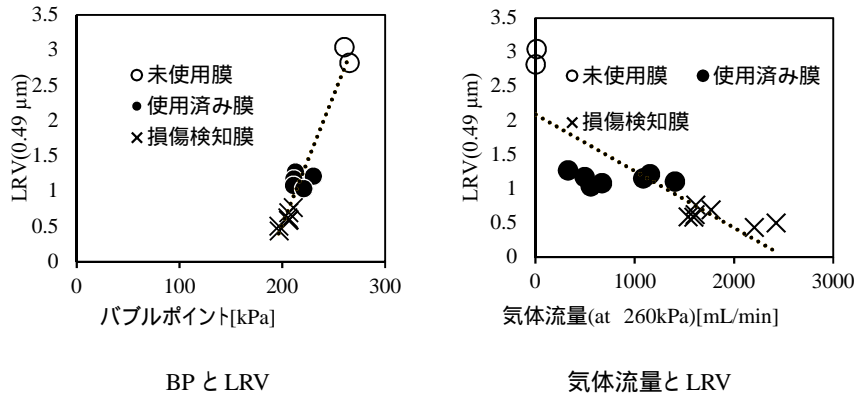


図3 蛍光粒子(0.49 μm)のLRVと気体透過性

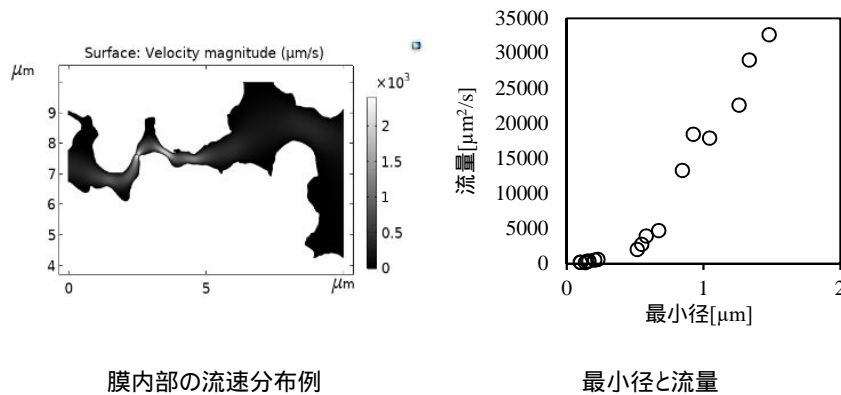


図4 膜内部の流れのシミュレーション結果

3) 統計モデルを用いた破断予測と膜交換時期予測

膜モジュールとしての性能低下に繋がる破断頻度や劣化の進行は、運転条件や原水水質に大きく依存していることから、膜ろ過施設に固有のデータである完全性試験に基づく異常検知数に非定常ポアソン過程モデルを適用し、将来の異常検知数を予測するモデルを構築した。膜交換時期の予測方法として、異常検知率に基づく方法、膜モジュールの性能に基づく方法、および累積異常検知数に基づく方法の3種類の観点があり、実際の異常検知データとの比較により方法を選択することが重要であることを提案した(図5)。膜モジュールの異常検知数にはばらつきが大きく、各膜モジュールの将来の異常検知数の予測には大きな差が見られた。ブートストラップ法を用いることでモジュール毎のばらつきを考慮した異常検知数の予測が可能となり、より適正な膜モジュール交換時期を判断可能となることを示した。

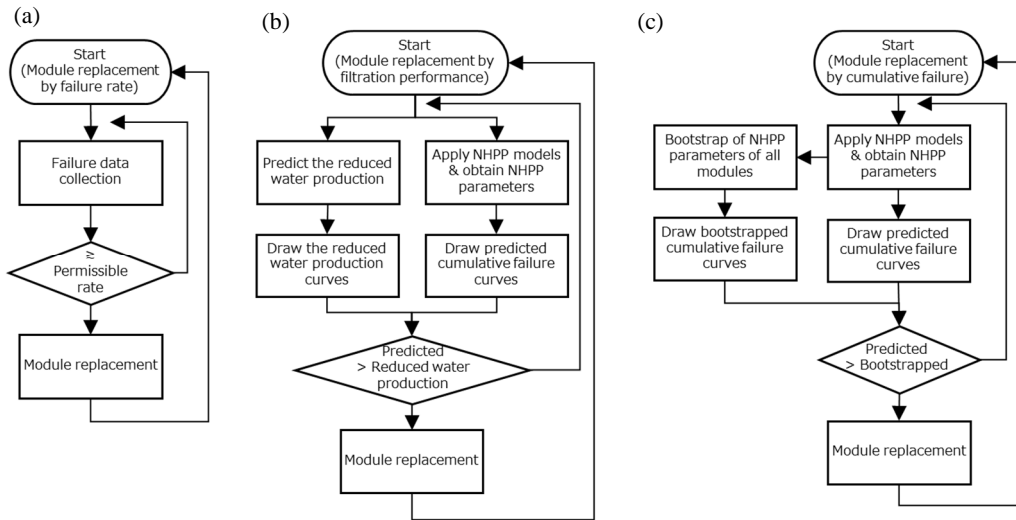


図5 膜モジュール交換時期の予測フローチャート。(a) 異常検知率による交換; (b) 膜ろ過性能に基づく交換; (c) 累積異常検知数に基づく交換
 . (Hashimoto and Takizawa, 2021 より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 平野雅己, 橋本崇史, 藤村一良, 片山浩之, 滝沢智	4. 巻 77
2. 論文標題 浄水中中空糸ろ過膜の加速試験による実処理場での劣化再現性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 111_329 ~ 111_338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejer.77.7_111_329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Takashi, Takizawa Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Prediction of Membrane Failure in a Water Purification Plant Using Nonhomogeneous Poisson Process Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 800 ~ 800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes11110800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cacciatori Caterina, Hashimoto Takashi, Takizawa Satoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Modeling and Analysis of Particle Deposition Processes on PVDF Membranes Using SEM Images and Image Generation by Auxiliary Classifier Generative Adversarial Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 2225 ~ 2225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w12082225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NAMOTO Koki, HASHIMOTO Takashi, KAZAMA Shinobu, OGUMA Kumiko, TAKIZAWA Satoshi	4. 巻 76
2. 論文標題 LONGITUDINAL FLOWRATE DISTRIBUTION AND BYPASS FLOW MEASUREMENT OF BROKEN HOLLOW FIBER MEMBRANES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	6. 最初と最後の頁 111_205 ~ 111_214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejer.76.7_111_205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 CACCIATORI Caterina、HASHIMOTO Takashi、TAKIZAWA Satoshi	4. 巻 76
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODELS FOR FEATURE EXTRACTION OF PVDF MEMBRANE SURFACES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	6. 最初と最後の頁 111_299 ~ 111_309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejer.76.7_111_299	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 澤有貴, 橋本崇史, 風間しのぶ, 小熊久美子, 藤村一良, 滝沢智	4. 巻 75
2. 論文標題 膜ろ過浄水処理における中空糸膜の劣化評価法の検討と劣化機構の解明	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 111_341 ~ 111_350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejer.75.7_111_341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 名本 昂生, 橋本 崇史, 風間 しのぶ, 小熊 久美子, 滝沢 智	4. 巻 Vol. 75, No.7
2. 論文標題 光ファイバセンサを用いた浄水用ろ過膜の損傷検知手法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 111_329-111_339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejer.75.7_111_329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Hashimoto, Patricia Anjerina Gunawan, Suraphong Wattanachira and Aunnop Wongrueng, Satoshi Takizawa	4. 巻 11(8)
2. 論文標題 Raw water storage as a simple means for controlling membrane fouling caused by inorganic foulants in river water in Chiang Mai, Thailand.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w11081592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平野雅己, 橋本崇史, 藤村一良, 片山浩之, 滝沢智
2. 発表標題 浄水施設で使用された中空糸膜を用いた完全性試験の阻止性能推定手法の評価
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野雅己, 橋本崇史, 藤村一良, 片山浩之, 滝沢智
2. 発表標題 浄水用中空糸ろ過膜の加速試験による実処理場での劣化再現性評価
3. 学会等名 第58回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野雅己, 橋本崇史, 藤村一良, 片山浩之, 滝沢智
2. 発表標題 浄水用中空糸ろ過膜の加速試験および実処理場での使用による劣化影響の比較
3. 学会等名 令和3年度水道研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本崇史
2. 発表標題 浄水用中空糸膜の劣化の機構とその診断方法
3. 学会等名 第37回ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本崇史
2. 発表標題 浄水用ろ過膜の完全性とそのモニタリングについて
3. 学会等名 第15回水道技術研究センター水道講座（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 名本昂生、橋本崇史、風間しのぶ、小熊久美子、滝沢智
2. 発表標題 浄水用中空糸ろ過膜破断時のろ過流量および膜内流量モデルにもとづく粒子阻止性能の評価
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野雅己、橋本崇史、片山浩之、滝沢智
2. 発表標題 次亜塩素酸ナトリウムによる薬品洗浄が浄水用中空糸ろ過膜の構造と粒子阻止性に与える影響
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 名本昂生、橋本崇史、風間しのぶ、小熊久美子、滝沢智
2. 発表標題 破断した浄水用中空糸膜における短絡流量の定量評価
3. 学会等名 令和2年度全国会議（水道研究発表会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平野雅己, 橋本崇史, 片山浩之, 滝沢智
2. 発表標題 浄水施設での長期使用による中空糸精密ろ過膜の微粒子阻止性能の劣化評価
3. 学会等名 第57回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 CACCIATORI Caterina, HASHIMOTO Takashi, TAKIZAWA Satoshi
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODELS FOR FEATURE EXTRACTION OF PVDF MEMBRANE SURFACES
3. 学会等名 第57回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 NAMOTO Koki, HASHIMOTO Takashi, KAZAMA Shinobu, OGUMA Kumiko, TAKIZAWA Satoshi
2. 発表標題 LONGITUDINAL FLOWRATE DISTRIBUTION AND BYPASS FLOW MEASUREMENT OF BROKEN HOLLOW FIBER MEMBRANES
3. 学会等名 第57回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米澤 有貴, 橋本 崇史, 風間 しのぶ, 小熊 久美子, 藤村 一良, 滝沢 智
2. 発表標題 浄水処理用PVDF製中空糸膜の定量的劣化評価手法の開発
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 名本 昂生, 橋本 崇史, 風間 しのぶ, 小熊 久美子, 滝沢 智
2. 発表標題 光ファイバセンサを用いた振動及び圧力監視による浄水用ろ過膜損傷検知の検討
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 米澤 有貴・橋本 崇史・風間 しのぶ, 小熊 久美子・藤村 一良・滝沢 智
2. 発表標題 膜ろ過浄水処理における中空糸膜の劣化評価法の検討と劣化機構の解明
3. 学会等名 第56回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 名本 昂生, 橋本 崇史, 風間しのぶ, 小熊久美子, 滝沢 智
2. 発表標題 光ファイバセンサを用いた浄水用ろ過膜の損傷検知手法の開発
3. 学会等名 第56回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米澤 有貴, 橋本 崇史, 風間しのぶ, 小熊久美子, 藤村一良, 滝沢 智
2. 発表標題 膜ろ過浄水処理における中空糸膜の劣化評価法の検討と劣化機構の解明
3. 学会等名 第91回水道研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Yonezawa, Takashi Hashimoto, Kumiko Oguma and Satoshi Takizawa
2. 発表標題 Analysis Of Ageing Mechanisms Of PVDF Hollow-fiber Membranes Used In A Water Purification Plant
3. 学会等名 The 7th International Water Association (IWA) specialist conference on natural organic matter in Water 2019(NOM7) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関