

〈研究発表〉

淀川へのセラミック膜ろ過技術の適応研究 (V)

村田直樹¹⁾, 青木伸浩²⁾, 本山信行³⁾

¹⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 R&D センター 環境技術開発部 膜技術開発グループ
 (〒451-0045 名古屋市西区名駅二丁目27番8号 名古屋プライムセントラルタワー
 E-mail: murata-naoki@metawater.co.jp)

²⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 R&D センター 環境技術開発部
 (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: aoki-nobuhiro@metawater.co.jp)

³⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 知的財産部
 (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: motoyama-nobuyuki@metawater.co.jp)

概要

本報では、水質変動が大きく、かつ高度に利活用された淀川原水への膜ろ過技術の適用性について、大阪市水道局と共同研究を行い、5年にわたって実施した研究結果を報告する。

前・後段にオゾン処理を配置した高度浄水膜ろ過システムは、現行高度浄水処理と同等の水処理性を確保することが可能であった。また、水量変動や停電等の事故時を想定した検証では膜差圧は安定しており、運転維持管理性においても、膜ろ過技術の適用可能性は高いと考えられた。

キーワード：有機物、オゾン、膜、ファウリング、バイオポリマー

原稿受付 2020.7.7

EICA: 25(2・3) 116-120

1. はじめに

水源水質の悪化に伴う異臭味やトリハロメタン等の消毒副生成物対策を目的として、オゾン、活性炭吸着等の高度浄水処理の導入が進められ効果を上げている¹⁾。しかし、現行処理施設は老朽化による更新時期を迎えており、給水量の減少に伴う収入減、保有高度浄水施設の有効活用、将来を見据えた処理技術の選択(現行処理の踏襲もしくは新技術導入)等の様々な問題を抱えているのが現状である。これらの問題を解決する可能性のある処理技術の一つとして膜ろ過処理が挙げられるが、安心・安全な浄水処理施設として導入され、かつ、長期間安定して運用するためには、膜ろ過ユニット数および動力費の削減、いわゆるイニシャルおよびランニングコストの低減が重要な課題である。その処理技術の一つとして膜ろ過処理が挙げられるが、安心・安全な浄水処理施設として導入され、かつ、長期間安定して運用するためには、膜ろ過ユニット数および動力費の削減、いわゆるイニシャルおよびランニングコストの低減が重要な課題である。

そのような中、大阪市水道局とメタウォーター(株)は、現有高度処理施設(オゾン接触池・GAC吸着池)の有効活用を念頭に、現行処理施設(凝集沈殿池・急速ろ過池)の削減が可能な膜ろ過技術の適用性について明らかにすることを目的として2015年度から共同研究を進めている。大阪市水道局の水源である淀川は、台風やゲリラ豪雨による濁度等の水質変動が大きく、

かつ、高度に利活用された表流水であるため、膜ろ過技術の研究や導入実績が少ないのが現状である。これまで筆者らは、「淀川原水へのセラミック膜ろ過技術の適応研究」として、4報を本研究発表会に報告²⁻⁴⁾してきた。具体的には、ポリ塩化アルミニウムを用いたオゾン+凝集処理による膜ろ過実験検証⁶⁻⁸⁾、硫酸アルミニウム(以下、硫酸ばんどとする)を用いた凝集+オゾン処理による膜前処理適用性検証⁹⁻¹⁰⁾を報告し、小型および大型セラミック膜を用いた実験検証によって、膜ろ過処理が淀川へ適用可能であることを明らかにしてきた。

本報では、前・後段にオゾン処理を配置した大型セラミック膜ろ過装置を用いて、コスト低減と安定した水処理が可能で、高流束かつ低膜差圧膜ろ過処理システムの構築を目指して、5年にわたって実施した研究結果を報告する。

2. 実験方法および装置

2.1 供試原水

淀川を水源としている大阪市水道局柴島浄水場の着水井でpH 7.0に調整された原水を本実験に使用した。

2.2 セラミック膜

実験にはFig. 1に示す膜構造を持つセラミック膜を用いた。セラミック膜はセラミック粒子を焼結させた多孔質体で、中間層の上に分離層を焼結させた膜厚

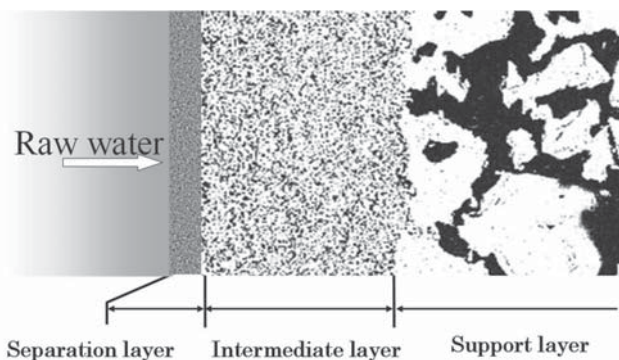


Fig. 1 セラミックの膜の構造

Table 1 セラミック膜の仕様

形状・膜種	モノリス型・MF膜
公称孔径	0.1 μm
膜面積	15 m ² /モジュール
外形・長さ	φ180×1000 mmL
純水透過性能	40 ≤ m ³ /(m ² ·d), 100 kPa at 25 °C

方向の構造が異なる非対称膜である¹¹⁾。膜表面（原水側）に分離層を有し、それ以外はほとんど分離に寄与しない多孔質の支持層にすることで通水抵抗を下けている¹¹⁾。セラミック膜の仕様を Table 1 に示す。表に示すように、純水透過性能が高いため、低動力での膜ろ過処理が可能である。また、膜ろ過セル径が 2.5 mm と大きいことや強力な逆流洗浄とブロー工程により、圧密化された濁質成分や藻類などを効率良く剥離、膜モジュール外に排出して膜ろ過セル内の流路閉塞を抑制することができる。

2.3 実証実験方法

2.3.1 実験フローおよび条件

実験は、既往の研究結果²⁻⁵⁾から現行処理の中オゾン施設を膜の前段処理として活用できるように配置した Fig. 2 に示す実験フローで実施した。図に示すように実証実験装置は、凝集槽、オゾン接触槽、セラミック

Table 2 実証実験条件

実施年度	凝集条件	中オゾン条件		膜ろ過条件		後オゾン条件	
	凝集剤注入率 (硫酸ばんど) [mg/L]	注入率 [mg/L]	接触時間 [min]	膜ろ過流速 [m ³ /(m ² ·d)]	目標物理 洗浄間隔 [hr]	平均 注入率 [mg/L]	接触 時間 [min]
2016	25-50	0.3-2.0	5	5.0	3.0	0.20	10
2017	25-50	0.3-2.0	10	6.0	4.0	未注入	
2018	30-50	0.3-1.4	10	7.0	4.0	0.12	10
2019	30-50	0.3-1.0	5	7.0	4.0	0.22	10

膜モジュール、物理洗浄水槽等から構成されている。

連続実証実験は、硫酸ばんどを用いて淀川原水を凝集処理し（沈殿処理工程なし）、凝集水全量の中オゾン接触塔でオゾン処理し、形成したマイクロフロックを膜モジュールへ供給して全量膜ろ過処理を行った。実証実験条件は Table 2 に示す条件で行い、凝集剤および中オゾン注入率は、現行処理（柴島浄水場）の注入率を参考に調整した。

物理洗浄は、膜ろ過水による逆流逆流洗浄とエアブローを実施し、洗浄間隔は 4 hr を基本とし、膜差圧による洗浄（差圧逆洗）も併用した。差圧逆洗条件は、物理洗浄後の実膜差圧から 20 kPa 上昇時とした。化学的強化逆洗¹³⁾（Chemically Enhanced Backwashing, 以下 CEB とする）の適用頻度は、2018 年 9 月まで膜差圧 80 kPa 程度に達した時点、2018 年 10 月以降は月 1 回を目安に実施した。CEB 工程は、希硫酸を pH 2 以下に調整し、膜モジュール内の原水側（一次側）膜表面に接触させ 10 min 浸漬、物理洗浄により硫酸をモジュール外に排出した。

高濁時におけるオゾン接触塔および膜モジュールへの流入濁度安定化を目的に、2019 年 6 月より濁度調整槽（滞留時間 7 min 程度）を適用した。また、同年 8 月よりろ過継続時間の延伸を目的に、差圧逆洗条件を 20 kPa から 25 kPa へ変更した。実証実験では、運転期間における膜ろ過差圧の長期的な推移を確認するとともに、原水および GAC 処理水の水質分析を行った。

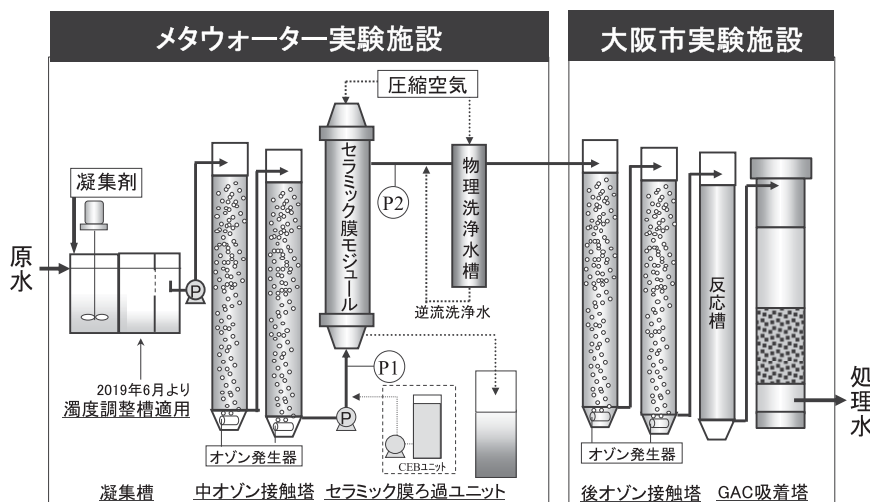


Fig. 2 実験フロー

2.4 異常時における膜ろ過特性評価

2.4.1 処理量変更時における膜ろ過性への影響

災害や浄水場での事故発生時には、浄水処理の継続が困難となり、他浄水場からのバックアップにより市内への給水量を維持しなければならないケースも想定される。この場合、当該浄水場では浄水処理停止を、バックアップを行う浄水場では処理水量の増加を迅速に行う必要がある。現行砂ろ過の運用において、ろ過水濁度の上昇や洗浄不良防止の観点から、処理量の変更幅に上限を設けており、実際池の操作におけるスロースタート・スローダウンの実施等、留意することが重要である。このため、膜ろ過においてもその操作性や特性について把握しておく必要があり、処理量変更による影響について評価を実施した。

実験条件を **Table 3** に示す。所定の膜ろ過流速で 20 分間運転させた後、膜ろ過流速を低下させて 5 分間膜ろ過運転を行った。その後、再び急激に膜ろ過流速を上昇させて膜ろ過を行い、その間における膜ろ過水濁度および膜差圧の挙動について影響を調査した。

2.4.2 停電・設備故障時における膜ろ過性への影響

停電や薬品設備故障時等の異常時においても可能な限り影響を最小限にすることが望ましく、本調査では想定されるこれらの異常時における膜ろ過への影響度を評価することを目的とした。

① 停電による膜ろ過性への影響

瞬時停止を想定し、膜ろ過を 1 時間継続した後、連続実験に関わる全て機器類を瞬時に停止し 10 分間放

置した。その後、復電を想定し、全ての機器を同時に稼働し再開した。調査項目は、オンラインによる膜差圧の計測と、復帰後 15 分の膜ろ過水中の濁度とした。濁度は微粒子カウンター（日本電色工業(株)NP6000T）により計測した。

② 薬品設備故障（凝集剤注入不足）における膜ろ過性への影響

薬品注入設備等の異常を想定し、凝集剤の未注入について実施した。未注入調査は、膜ろ過開始から 60 分間経過後膜ろ過を継続したまま、注入ポンプ故障を想定して凝集剤を停止した。続いて、凝集剤注入ポンプ停止 2 時間後で逆洗を実施した。調査項目は、オンラインによる膜差圧の計測と、実験中の膜ろ過水中の濁度とした。停電および薬品設備故障ともに 2016 年 10 月 20 日に実施した。

3. 結果と考察

3.1 実証実験結果

2016 年 9 月より膜ろ過流速 $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ で開始し、2017 年 6 月より $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ に、2018 年 3 月末より $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ に変更して、実証実験を継続している。**Fig. 3-5** に 2018 年 4 月からの実証実験結果を示した。**Fig. 3** の膜差圧の結果に示すように膜ろ過流速 $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ の高流速運転においても、低い膜差圧を維持しながら安定運転を継続することができた。CEB を月に 1 回程度、適切な頻度で実施することで、**Fig. 4** に物理洗浄間隔の結果を示す。淀川で藻類が発生する 7~8 月において、昨年度、平均 2.3 hr まで短縮したが、差圧逆洗条件を変更した今年度は、概ね 4 hr を確保できた。**Fig. 5** にオゾン注入率の結果を示す。中オゾンの年間平均注入率は、2018 年度、2019 年度ともに 0.9 mg/L 程度であった。一方、最大注入率は、2018 年度 1.4 mg/L であったのに対し、2019 年度 1.0 mg/L での運転が可能であった。この要因として、定期的な CEB 実施により、低い膜差圧での運

Table 3 処理量変更時の影響に関する実験条件

影響調査実施日	2017 年 1 月 12 日	
使用凝集剤	硫酸アルミニウム (8%)	
凝集剤注入率	26.6 mg/L	
中オゾン注入率	0.5 mg-O ₃ /L	
オゾン接触時間	≤5.0 min	
膜ろ過流速	定格時	$5.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
	水量低下時	$1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
物理洗浄圧力	逆圧洗浄: 500 kPa エアブロー: 200 kPa	

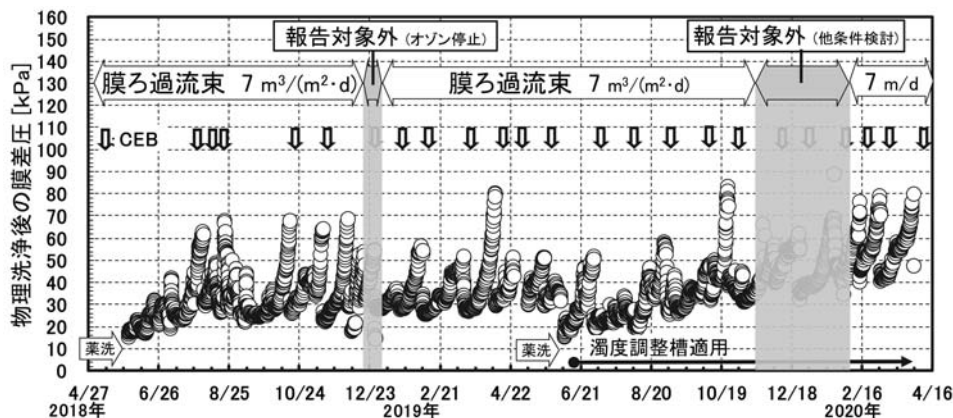


Fig. 3 膜差圧の結果

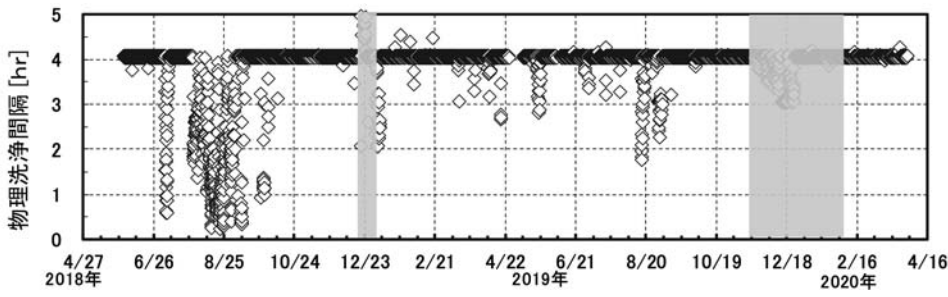


Fig. 4 ろ過継続時間の結果

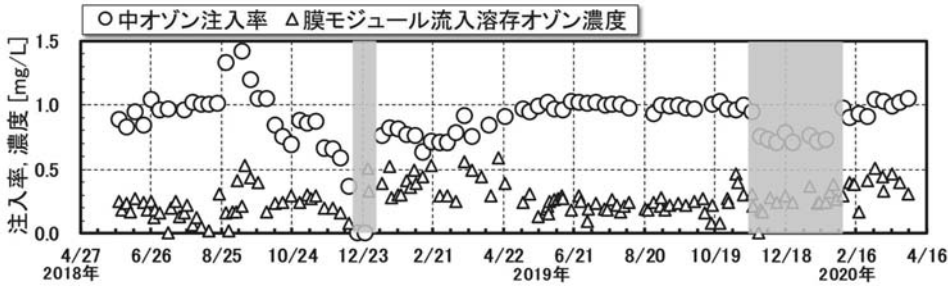


Fig. 5 オゾン注入率の結果

Table 4 2019年度の水質結果 (平均値)

	原水		現行GAC 処理水		膜ろ過GAC 処理水		
		n		n		n	
濁度	度	4.88	68	0.004	68	0.004	68
色度	度	6.9	35	0.19	35	0.19	35
TOC	mg/L	1.54	34	0.80	34	0.88	31
S-Mn	mg/L	0.048	35	0.001	35	0.001	32
E260	abs	0.036	35	0.005	35	0.007	32
臭素酸	mg/L	—	—	0.002	6	0.001	3

転を維持でき、その結果、膜ファウリング抑制に必要なオゾン注入率が下がったためと考えている。Fig. 3, Fig. 5 に示すように、CEBを月1回定期的に実施した2018年10月以降、中オゾン注入率1.0 mg/Lで、概ね膜差圧50 kPa以下での膜ろ過運転が可能であった。これらは、オゾン発生機の最大発生容量を小さくできることを意味しており、イニシャルコストを低減できる可能性が示唆された。

水質結果の一例として、Table 4 に2019年度の水質結果を示す (nは測定回数)。各水質項目ともに現行処理と概ね同等であり、2018年度¹⁴⁾と同様、高流束の運転条件下でも水処理性を十分確保できることが分かった。

流入濁度安定化については、2019年10月12日に上陸した台風19号により、原水濁度が200度を超過(最大320度)した状態が8hr継続したが、常に濁度調整槽出口濁度は200度以下であることを確認した。

流入濁度安定化については、2019年10月12日に上陸した台風19号により、原水濁度が200度を超過(最大320度)した状態が8hr継続したが、常に濁度調整槽出口濁度は200度以下であることを確認した。

3.2 異常時における膜ろ過特性評価

3.2.1 処理量変更時における膜ろ過性への影響

Fig. 6 に処理水変動調査を示す。処理量変更時において、濁度及び膜差圧に影響がない結果となった。現

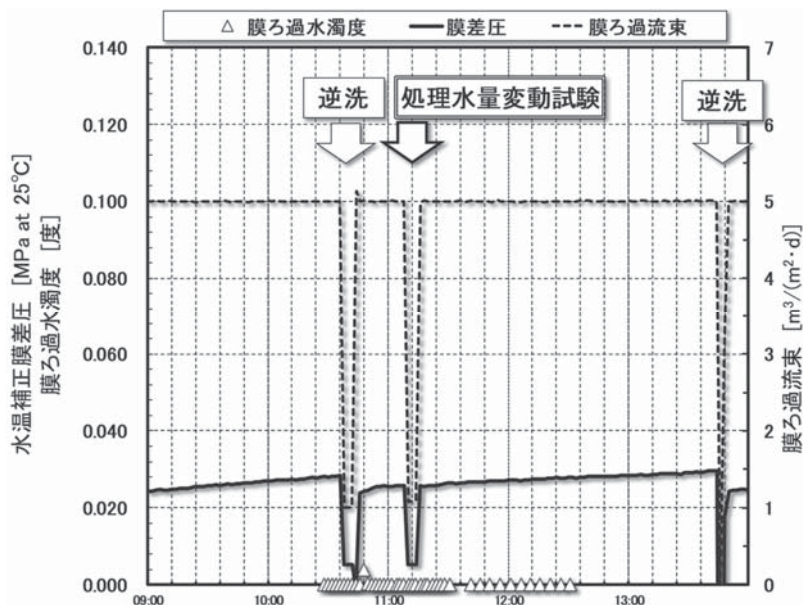


Fig. 6 処理量変更調査の結果

行の砂ろ過処理では、ろ過水濁度の上昇やろ層の不陸発生防止の観点から、処理量の変更幅に制限を設けているが、膜ろ過では制限を設けることなく瞬時に変更できることが確認された。

3.2.3 停電・設備故障時における膜ろ過性への影響

凝集剤未注入試験の結果、ろ過水の最大濁度は、並行して影響調査を行った現行処理では0.318度まで上昇したのに対して、膜ろ過では0.005度以下であった。また、膜差圧にも大きな影響がなかったことから、当該異常時においては、現行処理よりも影響を低減できることが確認できた。

4. ま と め

本研究では、淀川原水を用いて前・後段にオゾン処理を配置した高度浄水膜ろ過システムを適用し、5年以上に渡って連続実験検証を行った結果、以下のことがわかった。

- ▶ 原水水質や膜差圧の状況に応じて、月に1回程度適切な頻度でCEBを行うことにより、低い膜差圧での運転継続と最大オゾン注入率の低減が可能であった。
- ▶ 膜ろ過流速 $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ の運転条件下でも、物理洗浄条件を適切にすることで、概ね4hrのろ過継続が可能であるとともに、現行の高度浄水処理と概ね同等の水処理性を確保することができた。
- ▶ 膜ろ過流速の向上および運転動力の低減により、イニシャル・ランニング両面でのコスト削減が期待できることが分かった。

5. お わ り に

今後は、トータルシステムとしての適用可能性の評価等を進めていく。また、維持管理性も含めたより総合的なコスト評価を行い、最適な導入技術として向上させていきたいと考えている。

謝 辞

本研究は、大阪市水道局とメタウォーター(株)との共同研究で得られた成果の一部である。本研究にご協

力いただいた大阪市水道局工務部柴島浄水場(技術調査)の皆さまをはじめとする職員の方々に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 厚生労働省：水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討に等に関する技術資料，(2009)
- 2) 村田直樹，山口太秀，青木伸浩：淀川原水へのセラミック膜ろ過技術の適応研究，環境システム計測制御学会誌 21 (2/3)，pp.85-89，(2016)
- 3) 村田直樹，山口太秀，青木伸浩，李 富生：淀川原水へのセラミック膜ろ過技術の適応研究 (II)，環境システム計測制御学会誌 22 (2/3)，pp.20-26，(2017)
- 4) 村田直樹，本山信行，青木伸浩：淀川原水へのセラミック膜ろ過技術の適応研究 (III)，環境システム計測制御学会誌 23 (2/3)，pp.25-29，(2018)
- 5) 村田直樹，青木伸浩，本山信行：淀川原水へのセラミック膜ろ過技術の適応研究 (IV)，環境システム計測制御学会誌 24 (2/3)，pp.88-91，(2019)
- 6) 村田直樹，米川 均，青木伸浩，伊藤和徳：前オゾン処理を適用した凝集セラミック膜ろ過処理，第57回全国水道研究発表会講演集，pp.214-215，(2006)
- 7) 村田直樹，山口太秀，青木伸浩，柏原利行，田川克弘：淀川原水への浄水セラミック膜ろ過技術の適用について，平成28年度全国会議(水道研究発表会)講演集，pp.374-375 (2016)
- 8) 村田直樹，山口太秀，本山信行，李 富生：凝集およびオゾン処理が高度に活用された水道原水中のバイオポリマーへ与える影響，土木学会論文集 G (環境) 73 巻 7 号 pp.III_323-III_328，(2017)
- 9) 村田直樹，山口太秀，青木伸浩：淀川原水を用いたオゾン・セラミック膜ろ過技術の研究，日本オゾン協会 第26回年次研究講演会講演集，pp.73-76，(2017)
- 10) 村田直樹，山口太秀，青木伸浩，柏原利行，田川克弘：淀川原水への浄水セラミック膜ろ過技術の適用(II)，平成29年度全国会議(水道研究発表会)講演集，pp.244-245 (2017)
- 11) 米川均：浄水処理用モノリス型セラミック膜システムのろ過特性に関する研究，学位論文，北海道大学，pp.12，(2005)
- 12) 技報堂出版：浄水膜 (第2版)，pp.65
- 13) 村田直樹，青木伸浩，本山信行，李 富生：微粉末活性炭と化学的強化逆洗を組合せた膜ろ過処理における異臭味物質とトリハロメタン前駆物質の除去性能の向上，土木学会論文集 G (環境)，70 巻 7 号，pp.III_81-III_94，(2014)
- 14) 田川克弘，中村菜美子，村田直樹：淀川を原水とした浄水処理への膜ろ過技術の適用可能性に関する調査 (III)，令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集，pp.300-301 (2019)