

B-7 高濃度粉末活性炭添加MF(PAC-MF) 膜処理システムに関する研究

○石飛 勝也^{1*}・小熊 久美子¹・滝沢 智¹

¹東京大学工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1)

* E-mail: ishitobi@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. 研究の背景と目的

膜技術における主要な問題は、ファウリングによる処理量の低下である。特に、膜孔に近い大きさを持つ有機物による、膜孔の目詰まりや膜内部への吸着など、膜の内部に到達し、流路を妨げるようなファウリングは、逆洗浄などによる回復が難しく、著しい流量の低下を招く。ファウリングの原因物質はさまざまであるが、MF においては、分子量の大きいコロイド状の有機物質といった、天然有機物(NOM)が、主なファウリングの原因物質とされている¹⁾。ファウリングの対策としては、単位面積当たりの流束を落とす、膜の材質を変える、凝集・吸着といった前処理を施すといった方法が有効である¹⁾。特に、凝集・吸着による前処理は、有機物質の除去に非常に有効であり、有機物によるファウリングの軽減に効果を発揮する。

今回の調査で行った高濃度粉末活性炭添加膜処理(PAC-MF)システムは、高濃度の粉末活性炭(PAC)を、精密ろ過(MF)膜を浸漬させたリアクターと同じリアクターに投入する、そのため、有機物の除去をPACへの吸着により行うことが出来る。PAC-MF システムの場合、膜表面に蓄積したPAC ケーキ層が、主なファウリングの原因となる。しかし、膜孔よりも大きい粒径を持つ粒子が膜面に堆積したケーキ層によるファウリングは逆洗浄や曝気による軽減が容易であり、さらに、このケーキ層がより深刻なファウリングを起こす有機物等の膜内部への到達を防ぐという利点をもつ。また、PAC-MF システムは、活性炭の種類が処理水水质およびろ過性能に大きな影響を及ぼす。本研究では、2 種類の PAC を用いて、PAC-MF システムを運転し、PAC の違いによる処理能力の違いを調査するとともに、使用前後の PAC の圧縮性および運転後の膜モジュールのろ過抵抗の測定についても行うことで、処理能力の違いを生じる原因について検討した。

2. 実験方法

(1) PAC-MF装置の運転

本調査は、東京都の玉川浄水場にあるパイロットスケールの PAC-MF 装置を用いて、実験を行った。処理フローの概観を図1に示す。実験は、運転条件を変えて Run1, Run2, Run3 の計3回行った。各運転条件の詳細を表1に示す。膜モジュールは、いずれもクボタ(株)製外圧式管型非対称二重構造セラミック膜(公称口径 0.1μm, 有効膜面積 0.114m²)のものを3モジュール、15cm ずつずらし設置した。いずれの実験も、PAZ 内の曝気(40L/min)は実験中常に行い、膜ろ過層(MFZ)の曝気(40L/min)は逆洗浄中のみ行った。安定した流量(設定流量の 238.0mL/min)が得られなくなった場合には運転を停止した。

表 1. 運転条件の詳細

		Run1	Run 2	Run 3
実験期間		06/12/18~ 07/01/29	06/12/18~ 06/12/22	07/01/16~ 07/01/31
原水		多摩川河川水		
PAC	種類	白炭 S10	クラレコールGW-H	S10:GW=1:1
	投入量	20g/L(PAZ基準)		
サイクル		30分ろ過-10秒逆洗		

(2) PACの圧縮性の測定

PAC の比抵抗 r_c 、圧力 ΔP および圧縮性 n の関係を表す式として以下の式が経験的に用いられている。

$$r_c = \alpha_0 (\Delta P)^n \quad (\text{式 1})$$

よって、様々な圧力下での PAC の比抵抗を測定し、対数をとってプロットすれば、 n はその回帰直線の傾きとして求められる。

(3) ろ過抵抗成分の測定

ろ過抵抗に含まれる膜自体のろ過抵抗、膜表面に形成された PAC ケーキ層のろ過抵抗、目詰まりによるろ過抵抗、その他の一時的なろ過抵抗を、実験終了後の膜の洗浄前後でのろ過抵抗の差分として算出した。すなわち、PAC ケーキ層の抵抗は超音波洗浄の前後の抵抗の差に

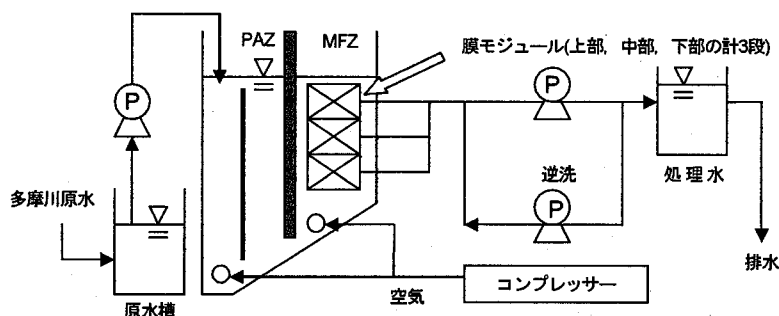


図1. PAC-MFプロセスの処理フロー

より求め、目詰まりによるろ過抵抗はその後に行う薬品洗浄の前後のろ過抵抗の差により求めた。また、薬品洗浄後のろ過抵抗を膜自体のろ過抵抗とした。薬品洗浄は、2%クエン酸ナトリウム溶液に4時間浸漬させた後、1%水酸化ナトリウム水溶液に4時間浸漬させて行った。Run2では、実験操作上、PAC ケーキ層のろ過抵抗の測定が不可能であったため、その他のろ過抵抗との和を示している。

3. 実験結果と考察

(1) 運転経緯

膜差圧の経時変化を図2に示す。Run1では、運転開始直後から膜差圧の穏やかな上昇が見られたものの、運転開始後500時間を過ぎるまで30kPa以下で推移した。その後比較的急な膜差圧の上昇が見られたものの、実験期間の800時間中は安定した流量を保つことが出来た。600時間前後でのばらつきは、メンテナンスによるものである。GWを投入したRun2では、膜差圧の上昇が激しく、わずか3日で90kPaを超え、運転が継続できなくなった。Run3でも、Run2より長期間運転できたものの、2週間ほどで膜差圧が約90kPaまで上昇した。

(2) PACの圧縮性

2種類のPACの、実験前後での圧縮性を図3に示す。式1より、図3中の回帰直線の傾きが圧縮性を表す。S10

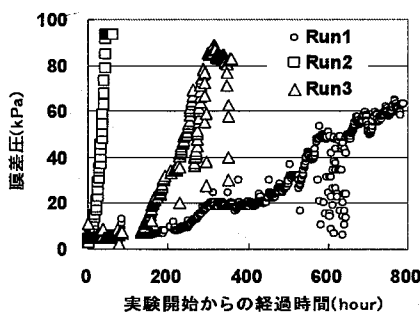


図2. 各ろ過実験による膜差圧の経時変化

は、使用前からある程度の圧縮性を有しており、実験後にはさらに圧縮性を増していた。一方、GWは、使用前には圧縮性が見られず、使用後には圧縮性が見られたものの、S10使用後の圧縮性に比べて小さかった。圧縮性の違いは、膜面に蓄積したPAC ケーキ層の密度に関係していると考えられるが、本実験では粒径の大きい活性炭GWのケーキ層密度のほうが低くなった。Zhaoら(2005)は、本研究と同じ玉川のパイロットスケール実験において、白鷺S10と、それよりも粒径の小さい活性炭（白鷺C1）による運転結果を報告しており、粒径が大きい白鷺S10において、活性炭の間に有機物が入り込んだために抵抗が上昇したものの、隙間の少ない構造をとったことで逆洗浄の効率は上昇すると指摘している²⁾。今回の実験では、GWはS10よりも粒径が大きかったものの、結果はS10のほうが圧縮性が高くなった。S10は、膜表面に形成したケーキ層が有機物を取り込み、隙間の少ない構造をとる上で最適の粒径であると考えられ、これよりも大きい活性炭GWの場合には、活性炭同士の隙間がさらに大きく、有機物をケーキ層に取り込むことが出来なかったものと考えられる。

(3) ろ過抵抗の成分の詳細

Run1～Run3における、各膜モジュールにおける目詰まりによる抵抗を図4に示す。まず、全抵抗であるが、これは実験終了直前の膜差圧から算出したものであり、Run1にくらべてRun2,Run3は非常に大きかった。また、

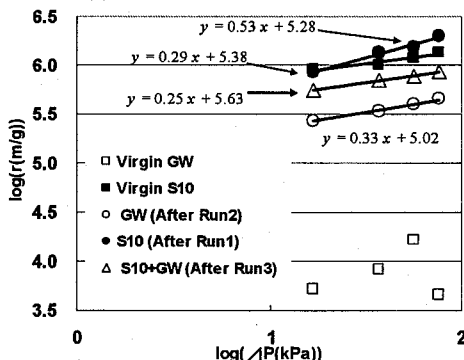


表3. PACの圧縮性

Run1 は高さ方法に違いがあまりみられなかった。Run2 では目詰まりによる抵抗が比較的大きいとともに、下部ほど大きいという違いが見られた。また、Run3 では、PAC ケーキ層による抵抗が上部ほど大きかった。

目詰まりによる抵抗の高さ方向による違いは、GW の方が吸着能力が低いためであると考えられる。PAZ で有機物が十分に吸着出来なかった場合、MFZ の下部から有機物が移動してくる。そのため、まず、下部の膜で目詰まりを起こすとともにある程度有機物が除去され、次いで、中部、上部への移動中に有機物の目詰まり量が減ると考えられる。

PAC ケーキ抵抗の高さ方向の違いは、GW の圧縮性の低さが原因であると考えられる。圧縮性が低い GW は、隙間の多い構造をとり、S10 のケーキ層に比べて逆洗浄の効率が悪く、曝気により剥ぎ取られやすいと推定される。そのため、曝気により剥ぎ取られた PAC が上部へ濃縮しやすい傾向にあり、上部ほど PAC ケーキ層による抵抗が高くなるものと考えられる。実際に膜モジュールに付着した PAC の重量の測定結果を表 2 に示す。これから分かるように、GW を半分混ぜた Run3 の方が、上部へ付着しやすい傾向にある。

表 2. 膜モジュールへの PAC 付着量の比較

	実際の付着量(g)		下部に対する比	
	Run1	Run3	Run1	Run3
上部	7.80	10.13	1.33	1.55
中部	6.00	7.23	1.03	1.11
下部	5.85	6.53	1.00	1.00

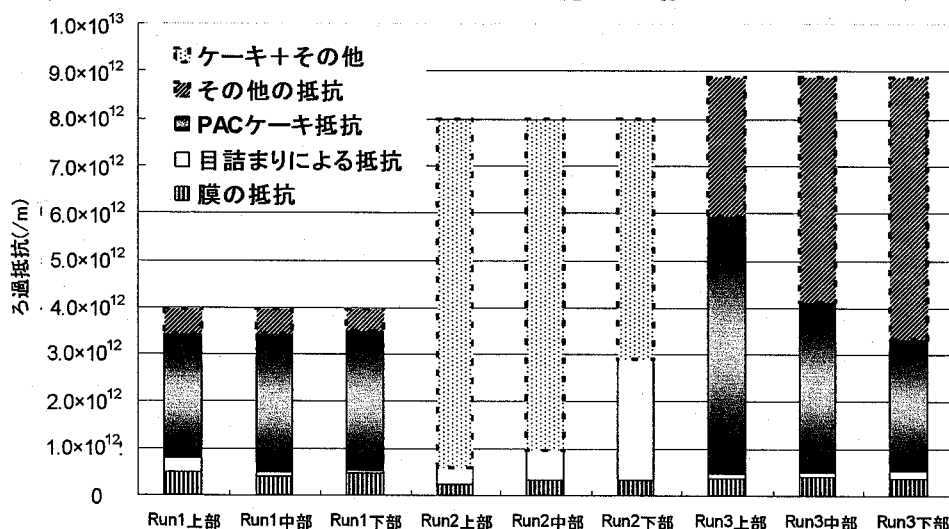


図 4. 各ろ過実験における膜モジュールごとの抵抗成分の詳細

4. まとめ

PAC-MFシステムにおいて、S10とGWの2種類のPACを用いたろ過実験の結果、以下のことが分かった。

- ①PACとしてS10を用いた実験(Run1)では、実験期間800時間中、安定して運転ができた。
- ②PACとしてGWを用いた実験(Run2, Run3)では、膜差圧の上昇が早く、運転継続期間が短かった。
- ③PACの圧縮性に関しては、使用前、使用后ともにS10の方が圧縮性が大きく、特に使用前のGWには圧縮性が見られなかった。
- ④膜モジュールの全ろ過抵抗に関しては、Run2, Run3はRun1に比べて大きかった。
- ⑤目詰まりによる抵抗はRun2において顕著であり、さらに上部>中部>下部という高さ方向の違いも見られた。
- ⑥PACケーキ層の抵抗は、Run1では、高さ方向に違いが見られなかったが、Run3では上部>中部>下部の順に違いが見られた。

謝辞：本研究の一部は、東京都水道局からの委託研究として行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Rolando F., Eun K.L., Christopher W.K.C., Vicki C. and Mary D.: Pre-treatments to reduce fouling of low pressure micro-filtration (MF) membranes, *Journal of membrane science*, Vol. 289, pp. 231-240, 2006.
- 2) Zhao P., Takizawa S., Katayama H., and Ohgaki S.: Factors causing PAC cake fouling in PAC-MF (powdered activated carbon-microfiltration) water treatment systems, *Water Science & Technology*, Vol 51, pp. 231-240, 2005.