

# 担体投入型膜分離活性汚泥法の長期連続実下水処理による運転評価

廃棄物・有害物管理工学研究室 酒井陽介  
指導教員 小松俊哉 藤田昌一 姫野修司

## 1.はじめに

湖沼や内湾などの閉鎖性水域は、しばしば富栄養化の進行に伴う赤潮などの影響被害に見舞われるようになってきた。その富栄養化対策としては生活系排水からの窒素やリンの除去が決め手とされ、従来より研究が進められてきた。しかし、現在でも下水処理方法の主流として窒素、リンの除去率が低い標準活性汚泥法が多く採用されており、今もなお、処理水の放流先の富栄養化が懸念されており、高度処理の導入が求められている。

そのような中、最近の下水処理技術関連の話題の1つに膜分離活性汚泥法の導入開始がある。膜分離活性汚泥法は、高濃度微生物により効率的に窒素除去が行なえる処理方法として注目されている。

しかし、膜分離活性汚泥法は膜による過作用で処理水を引き抜く処理法であるために、膜の目詰まりが生じるという維持管理上の問題点を抱えているということが挙げられる。そのため、膜分離法では膜の目詰まりを抑制するために、膜面の曝気洗浄を行っており、他の処理法と比較して曝気強度が非常に強く、曝気にかかるエネルギーが維持管理コストを引き上げており、膜分離活性汚泥法の適用規模の拡大を図るためには、曝気強度の削減が欠かせないと考えられる。

## 2.目的

そこで本研究室では、膜分離法のランニングコスト低減化のために反応槽への担体投入が有効となる可能性に着目し、一槽式膜分離反応槽内に担体を投入することで、80%以上の窒素除去率の達成および膜透過性能の向上を図れることを人工排水および実下水による実験で確認した。<sup>1)</sup> これにより、担体投入系では曝気量を縮減できる可能性が示唆された。

そこで本研究では、実下水を用いた膜分離活性汚泥法装置の長期的な連続運転を行ない、担体添加の有無および異なる曝気線速度の条件での膜透過性能、有機物および窒素除去能から評価し、間欠曝気と担体による膜面付着物剥離効果によって、低コスト・省エネルギー化を実

証し、膜分離活性汚泥法の促進を目的とする。また、凝集剤によるリン除去の検討も行なう。

目標処理水質は BOD: 10mg/L, TOC: 10mg/L, T-N: 10mg/L, T-P: 1mg/L とする。

## 3.実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。

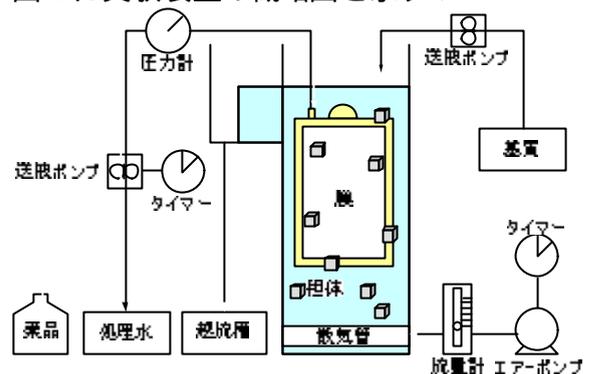


図1 実験装置の概略図

この装置は長岡浄化センターに設置した。有効容積 20L の反応槽に(株)クボタの MF 膜(孔径 0.45 $\mu$ m, 0.11m<sup>2</sup>)を浸漬させ、曝気時のみポンプによる吸引ろ過を行ない、吸引開始前と終了後に 2 分間曝気のみを行なった。流入基質は浄化センターの沈砂池越流水を用いた。担体は(株)西原環境テクノロジーのリンポーキューブ(5mm 立方体, 多孔質ポリウレタン)を用いた。なお、1 日 1 回膜間差圧の調整により膜透過流速を保つようにし、膜間差圧が 30kPa に達した時点で、次亜塩素酸ナトリウムを用いたオンライン薬品洗浄によって膜洗浄を行なった。

表 1 に示す実験条件により、Run1, 3 はそれぞれ担体無しと有りで曝気線速度(膜ユニット内の流速について、膜洗浄空気量をユニット投影面積で割ったもの)を 0.4 m/min とし、Run2 は担体有りで曝気線速度を 0.2 m/min とし、有機物、窒素除去能および膜透過性能の調査を約 250 日間(05/05/25 ~ 06/01/25)の連続運転により行なった。また、リン除去効果を確認するために Run4 には凝集剤(PAC)の添加をし、凝集剤を添加しない同条件の Run3 との比較を実験終盤の約 20 日間の運転により行なった。

表 1 実験条件

		単位	Run1	Run2	Run3	Run4
形式	-		一槽式			
反応槽容量	L		20			
膜枚数	枚		2			
膜	種類	-	平膜			
	材質	-	ポリオレフィン			
	面積	m <sup>2</sup> /枚	0.11			
	孔径	μm	0.45			
設定HRT	hr	6				
設定FLUX	m/day	0.36				
初期汚泥MLSS	mg/L	2500				
曝気:非曝気時間	min:min	28:32				
吸引:非吸引時間	min:min	24:36				
曝気線速度	m/min	0.4	0.2	0.4	0.4	
担体添加率 (担体体積/槽容量)	%	0	10	10	10	
担体	材質	-	多孔質ポリウレタン			
	寸法	-	一辺 5mm 立方体			
PAC添加量 (Al添加量)	mg-Al/L	0	0	0	2	
使用基質	-	沈砂池越流水				
流入水温		8.0	~			27.0
流入BOD濃度	mg-BOD/L	156.8	±	39.8		
流入TOC濃度	mg-TOC/L	85.8	±	20.5		
流入T-N濃度	mg-N/L	35.7	±	8.4		
流入T-P濃度	mg-P/L	4.6	±	1.5		

### 3.結果および考察

#### 3.1.長期連続実験

##### 3.1.1.汚泥性状

本実験では、初期汚泥として長岡浄化センターの返送汚泥を用いた。

図 2 に全 MLSS の推移を示し、図中の矢印は薬品洗浄を行なったことを表す。全 MLSS は次式によって表される。

$$MLSS [mg/L] = a1 \times (100 - \frac{c1}{100}) + b1 \times \frac{c1}{100}$$

a1=浮遊 MLSS(mg/L)

b1=担体付着汚泥量(mg/L-担体)

c1=担体添加率(%)

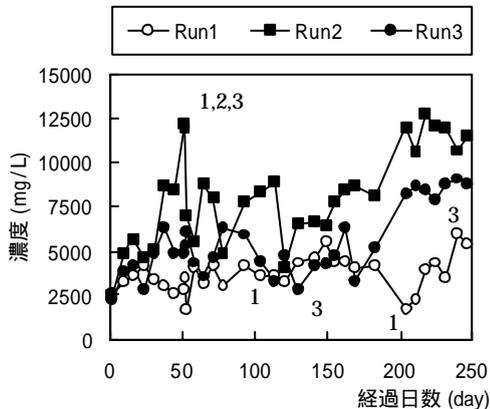


図 2 全 MLSS の推移

最終的な全 MLSS は Run1 : 約 5000 mg/L, Run2 : 約 12000 mg/L, Run3 : 約 9000 mg/L であり, MLVSS/MLSS が 70~80%であった。担体付着汚泥量は全 MLSS の 4%程度であった。

また、薬品洗浄による影響が 50 日目に顕著に見られた。50 日目に薬品洗浄を行ない、翌日に MLSS を測定したところ、半分程度まで濃度が減少していた。その後はすぐに回復し、100 日目以降に行なった薬品洗浄では顕著な影響は見られなかった。これは、この時のみ薬品濃度が高かったというミスによる影響、もしくは、硝化菌は感受性が高いため、薬品の影響を受けやすく、さらに SRT が 5 日程度の返送汚泥を初期汚泥として用いたため、汚泥中の硝化菌の量が少なかったことより、50 日目では薬品の影響が顕著になり、100 日目以降では、硝化菌量も増加したため顕著な影響は見られなかった可能性も考えられる。

##### 3.1.2.有機物除去能

図 3 に処理水中の BOD 濃度、図 4 に TOC 濃度の推移を示す。

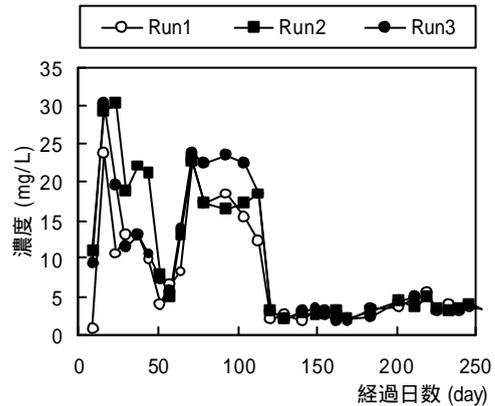


図 3 処理水中の BOD 濃度の推移

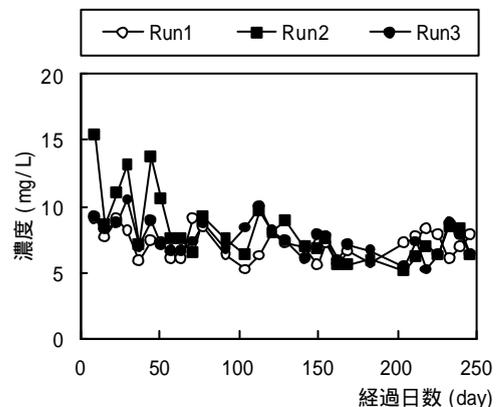


図 4 処理水中の TOC 濃度の推移

実験 120 日目までは基質の採水方法に問題があり、高濃度の有機物が流入してしまった。そこで、120 日目以降について考察を行なう。処理水の平均 BOD 濃度 [除去率] は、Run1 : 3.3 mg/L [97.8%] , Run2 : 3.2 mg/L [97.8%] , Run3 : 3.4 mg/L [97.7%] であり、処理水の平均 TOC 濃度 [除去率] は、Run1 : 6.96 mg/L [91.4%] , Run2 : 6.83 mg/L [91.6%] , Run3 : 6.92 mg/L [91.5%] であり、この結果より、全 Run において良好な処理が行なえていたと言える。薬品洗浄の影響も見られなかった。

### 3.1.3.窒素除去能

図 5 に処理水中の T-N 濃度の推移、図 6 に実験期間中の処理水および流入下水中の平均窒素濃度組成を示す。

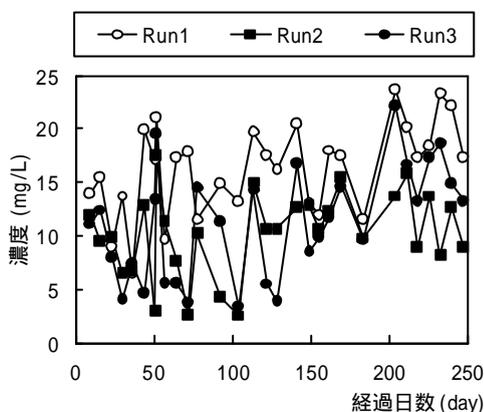


図 5 処理水中 T-N 濃度の推移

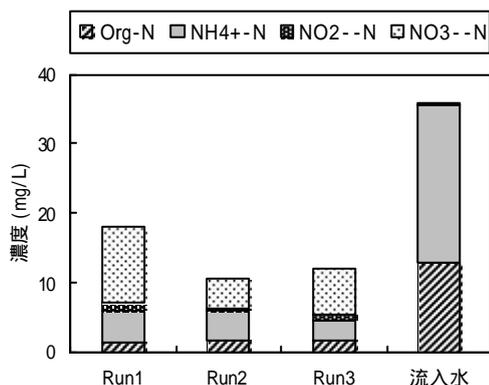


図 6 平均窒素濃度組成

処理水の平均 T-N 濃度 [除去率] は、Run1 : 16.1 mg-N/L [53.3%] , Run2 : 10.0 mg-N/L [70.6%] , Run3 : 10.9 mg-N/L [68.3%] であり、担体を添加し、曝気線速度を 0.2 m/min にした Run2 が最も処理能力が高かった。

各態窒素組成において、NO<sub>3</sub>-N の含有量に

明確な違いが見られた。処理水中の平均 NO<sub>3</sub>-N 含有濃度は Run1 : 10.9 mg-N/L , Run2 : 4.3 mg-N/L , Run3 : 6.5 mg-N/L であった。

NO<sub>3</sub>-N の蓄積の原因としては、有機物不足もしくは残存 DO による脱窒阻害が挙げられる。しかし、Run2, 3 ではさほど NO<sub>3</sub>-N の蓄積が見られないため、有機物不足は考えにくい。そこで、残存 DO による阻害であると考えられる。平均 DO が Run1 : 好気時 7.67 mg-O<sub>2</sub>/L , 無酸素時 4.26 mg-O<sub>2</sub>/L , Run2 : 好気時 1.31 mg-O<sub>2</sub>/L , 無酸素時 0.04 mg-O<sub>2</sub>/L , Run3 : 好気時 2.92 mg-O<sub>2</sub>/L , 無酸素時 0.78 mg-O<sub>2</sub>/L であり、Run1 は無酸素時にも関わらず、DO が 4.26 mg-O<sub>2</sub>/L もあり、脱窒が行なえる環境ではなく、NO<sub>3</sub>-N の蓄積が顕著であったと考えられる。

Run1 と同じ曝気線速度 0.4 m/min の Run3 では NO<sub>3</sub>-N の蓄積は多少見られたが、担体表面には好気部、内部には無酸素部が形成され、処理工程が好気時にも内部では脱窒が進行する環境にあると推定される。そのため、担体を添加することで脱窒が促進され、Run1 と Run3 のような差が見られたと考えられる。

### 3.1.4.リン除去能

図 7 に処理水中の T-P 濃度の推移を示す。

処理水の平均 T-P 濃度 [除去率] は、Run1 : 2.62 mg-P/L [41.3%] , Run2 : 1.93 mg-P/L [56.7%] , Run3 : 2.31 mg-P/L [48.3%] であり、曝気線速度が低い Run2 が最も除去能があったが、他の Run と比べても大差はなく、目標処理水質を達成することは出来なかった。

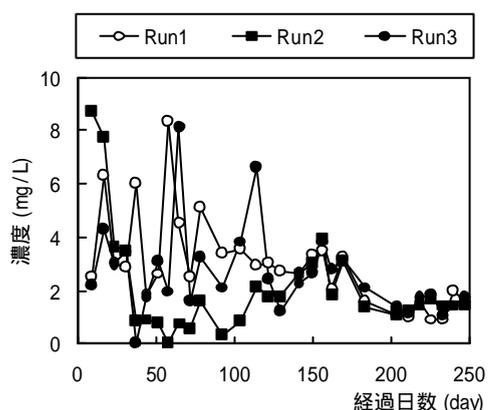


図 7 処理水中 T-P 濃度の推移(5 日平均)

生物学的リン除去法は AO 法や A<sub>2</sub>O 法に代表されるように、活性汚泥は嫌気時にリンを放出し、放出後の好気時に放出したリン量以上を取り込むという性質を利用してリン除去を行な

っている。しかし、嫌気槽を設けても、生物学的リン除去法は流入水質の影響を受けやすいため、処理水質が安定しないことが問題となっている。一般的に凝集剤添加法が主流であるため、凝集剤添加の検討の必要性が示唆された。

### 3.1.5.膜透過性能

図8に膜間差圧、図9にFLUX(膜透過流束)、図10にろ過抵抗の推移を示す。図中の矢印は薬品洗浄を行なったことを表す。

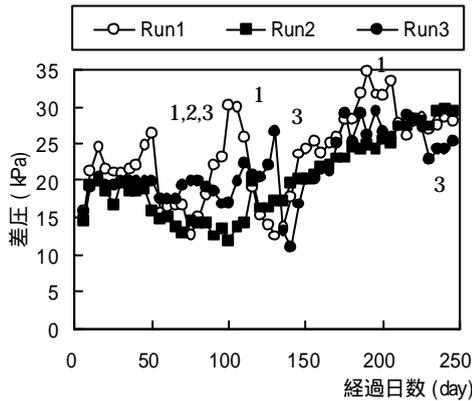


図8 膜間差圧の推移(5日平均)

運転期間中の差圧の平均は Run1 : 23 kPa, Run2 : 20 kPa, Run3 : 22 kPaであった。

膜透過流束の平均は Run1 : 0.19 m/day, Run2 : 0.24 m/day, Run3 : 0.20 m/dayで、薬品洗浄回数も Run1 : 3回, Run2 : 1回, Run3 : 3回であったため、Run2の膜透過性能が最も維持されていたと言える。

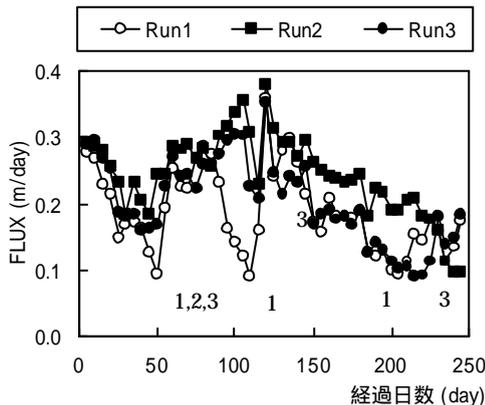


図9 FLUXの推移(5日平均)

また、Run1とRun3においては、平均値ではあまり差が見られないが、特にろ過抵抗のグラフを見るとその差が顕著である。ろ過抵抗は次式で表される。

$$\text{ろ過抵抗 } R [1/m] = \frac{\text{差圧 } \Delta P [\text{Pa}]}{\text{水粘度 } \eta [\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot \text{Flux} [\text{m/day}]}$$

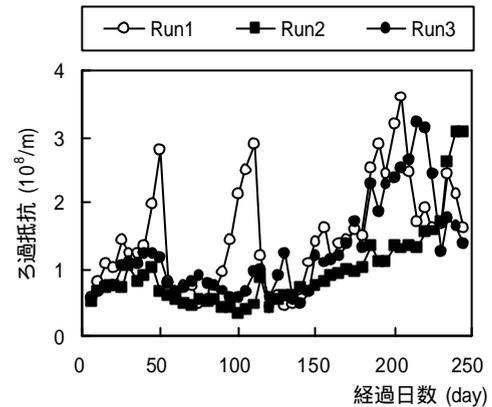


図10 ろ過抵抗の推移(5日平均)

Run1は急激なるろ過抵抗の上昇が起こっているが、Run3は膜間差圧の上昇が見られるが、膜透過流束の急激な低下は見られなかった。これは、担体による膜面付着物剥離効果によって、膜面への付着が抑制されたためであると考えられる。

曝気線速度が低いRun2の膜透過性能が長期間維持されていた理由として、曝気強度が弱いため、他Runと比べ、活性汚泥がフロックを形成しやすい環境であったことが考えられる。そのことを裏付ける理由として、Run2では活性汚泥フロックの曝気による破壊が起き難く、MLSSが高濃度に保たれたことが考えられる。

### 3.2.凝集剤添加実験

凝集剤添加開始前までは、Run3, Run4は同条件で運転を行っており、処理性能もほぼ同程度であった。

#### 3.2.1.汚泥性状

図11に全MLSSの推移を示す。

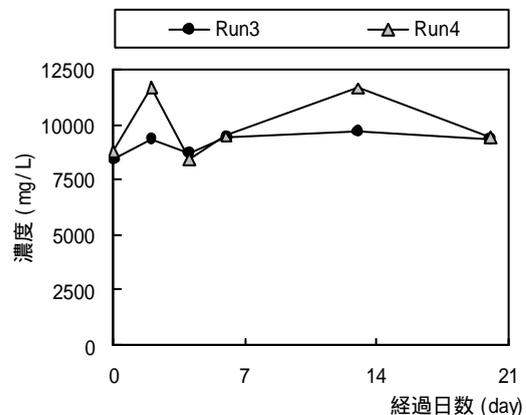


図11 全MLSSの推移

凝集剤を添加することで、リンがアルミニウム塩となって、反応槽内に蓄積するため、無機汚泥の蓄積が考えられたが、今回の実験においては、Run3、Run4の浮遊および担体MLVSS/MLSSが約70~80%と同程度であり、明確な無機汚泥の蓄積は見られなかった。

また、凝集剤による生物量への影響も見られなかった。

### 3.2.2. 有機物除去能

処理水の平均BOD濃度[除去率]は、Run3: 3.99 mg/L[96.8%], Run4: 3.73 mg/L[96.1%]であり、凝集剤添加の効果は見られなかったが良好な処理が行なえていた。

しかし、有機物のもう1つの指標であるTOCにおいては、図12に示すように、処理水の平均TOC濃度[除去率]は、Run3: 7.73 mg/L[89.2%], Run4: 4.53 mg/L[93.7%]であり、BODでは見られなかったPACによる有機物除去能が確認できた。BODとTOCは有機物の指標であるが、BODでは測定されない難生物分解性の有機物が、凝集沈殿によって除去されたため、BODでは見られなかったPACによる有機物除去がTOCにおいて確認できたと考えられる。

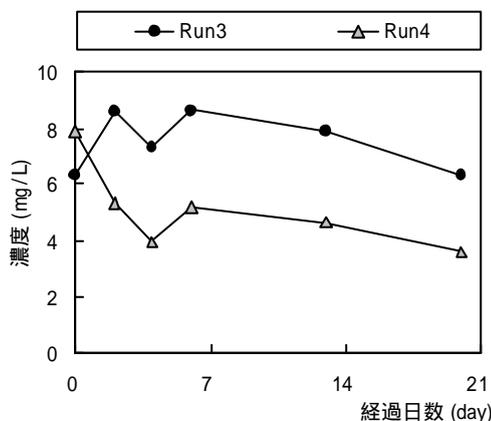


図12 処理水中のTOC濃度の推移

### 3.2.3. 窒素除去能

処理水の平均T-N濃度[除去率]は、Run3: 15.94 mg-N/L[54.8%], Run4: 14.68 mg-N/L[59.5%]であり、若干ではあるが凝集剤を添加したRun4の方が除去率は高かった。昨年1)の松本による「冬季における連続実験」では、ほぼ同条件のRunのT-N除去率は57.6%であり、ほぼ同程度の除去能であった。この実験は低水温期に行なったため、汚泥活性が低下しており、低いT-N除去率になったと考えられる。

ここで注目すべきは、PACを添加したことで、

薬品に対する感受性が高い硝化菌への影響であるが、Run3、Run4においてあまり差が見られなかった。アルミニウム添加量が2 mg-Al/Lであったので、PACによる生物活性阻害が無く、Run3に比べRun4の硝化が進行していた。

### 3.2.4. リン除去能

図13に処理水中のT-P濃度の推移を示す。

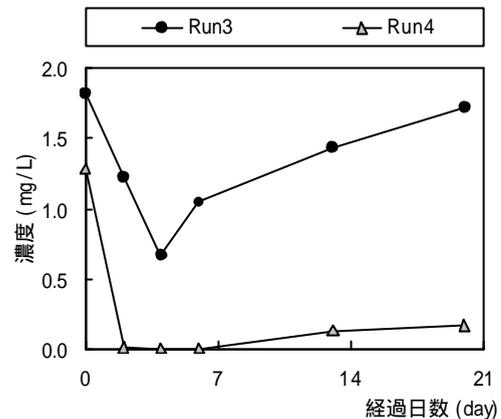


図13 処理水中のT-P濃度の推移

処理水の平均T-P濃度[除去率]は、Run3: 1.22 mg-P/L[46.5%], Run4: 0.06 mg-P/L[94.8%]であり、本来の目的であるPACによるリン除去の効果が明確に現れ、凝集剤を添加することによって高いリン除去が可能であることが確認できた。

### 3.2.5. 膜透過性能

図14に膜間差圧、図15にFLUX(膜透過流束)の推移を示す。

運転期間中の膜間差圧の平均はRun3: 24 kPa, Run4: 24 kPaであった。膜透過流束の平均はRun3: 0.15 m/day, Run4: 0.19 m/dayであった。

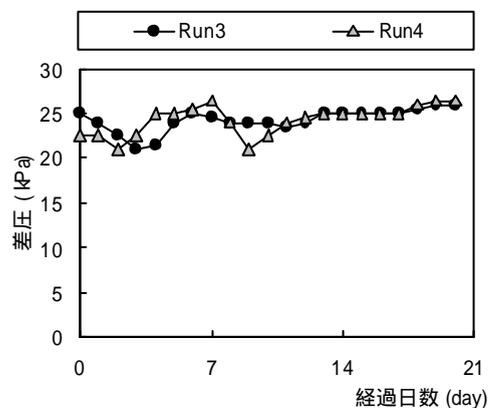


図14 膜間差圧の推移

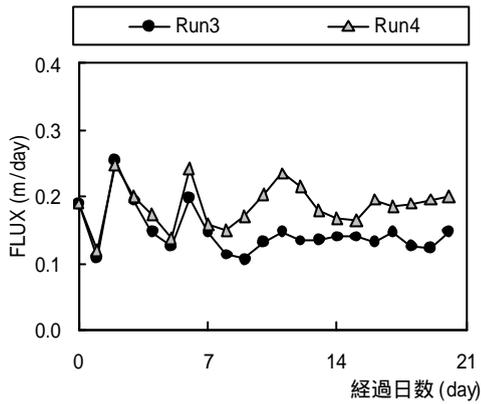


図 15 FLUX の推移

膜間差圧に関してはほぼ同程度であったことが分かるが、膜透過流束に関しては、日数が経過するにしたがって、Run4 の凝集剤を添加した方が高く維持できていた。これは、凝集剤によって活性汚泥も凝集し、フロックが大きくなったことで、膜目詰まりが抑制されたことが原因であると考えられる。また、処理水中の TOC においても Run4 の除去率が高かったため、菌体から剥離した浮遊 EPS や生物代謝産物などの難分解性有機物が凝集剤によって除去(凝集)されたと考えられる。すなわち、膜目詰まりの原因物質が除去され、膜目詰まりが抑制されたことも原因のひとつであると言える。

以上より、凝集剤を添加することによって、膜透過性能が向上することが確認された。

#### 4. まとめ

本研究では、担体投入型一槽間欠曝気式膜分離活性汚泥法の長期連続実下水処理における運転性能評価を以下の項目について行なった。

- ・ 担体投入による処理性能、膜透過性能への効果の確認。
  - ・ 担体投入による曝気量の削減効果。
  - ・ 凝集剤によるリン除去の効果。
- その結果、以下のことが得られた。

##### 4.1. 有機物除去能

- ・ 平均 BOD 除去率は、Run1：97.8%、Run2：97.8%、Run3：97.7%、TOC 除去率は、Run1：91.4%、Run2：91.6%、Run3：91.5%であった。
- ・ 全 Run において、処理水の BOD 濃度は良好な処理が行なえていた。

##### 4.2. 窒素除去能

- ・ 担体添加無しの Run1 において、無酸素時

の DO 残存が影響し、顕著な  $\text{NO}_3^-$ -N 蓄積が見られた。

- ・ 平均 T-N 除去率は、Run1：53.3%、Run2：70.6%、Run3：68.3%であり、Run1 の窒素除去率は他 Run と比べて低くなった。

##### 4.3. リン除去能

- ・ 平均 T-P 除去率は、Run1：41.3%、Run2：56.7%、Run3：48.3%であった。
- ・ 生物学的リン除去では変動が激しく、目標処理水質を一定に達成することは出来なかった。

##### 4.4. 膜透過性能

- ・ 膜透過流束の平均は Run1：0.19 m/day、Run2：0.24 m/day、Run3：0.20 m/day、薬品洗浄回数は Run1：3 回、Run2：1 回、Run3：3 回であり、Run2 の膜透過性能が長期にわたり最も維持されていた。
- ・ Run1 は Run3 に比べ、ろ過抵抗の急激な上昇が見られ、担体による効果が確認された。

##### 4.5. 凝集剤添加による効果

- ・ 有機物は特に TOC において凝集効果による除去が見られた。
- ・ 窒素は凝集剤による効果は見られず、薬品による阻害も見られなかった。
- ・ リンの平均除去率は、Run3：62.7%、Run4：98.4%であり、凝集剤の効果が確認できた。
- ・ 膜透過流束の平均は Run3：0.15 m/day、Run4：0.19 m/day であり、Run4 は Run3 に比べ、ろ過抵抗の上昇が抑えられた。

以上の長期連続実下水処理実験によって、担体を添加することで 1/2 の曝気線速度でも、格段に安定した膜透過性能が得られることが分かった。また、曝気が強いときに生じやすい活性汚泥のフロックの形成に対する阻害もなく、その結果、膜目詰まりも抑えられ、薬品洗浄回数も大幅に抑えることが出来た。

さらには、凝集剤を本システムに導入することで、有機物や窒素除去能に悪影響を与えることなく、高いリン除去能を発揮した。

よって、これまでよりも低コスト・省エネルギーかつ易メンテナンスなシステムであることを確認することが出来た。

#### 参考文献

- 1) 松本拓郎：担体投入型膜分離活性汚泥法の実下水処理への適用，長岡技術科学大学修士論文，2005