

一槽間欠曝気式膜分離活性汚泥法における担体投入効果

廃棄物・有害物管理工学研究室 田村佳之

指導教官 小松俊哉 藤田昌一 姫野修司

1. 背景

膜分離活性汚泥法は閉鎖性水域における富栄養化の一因である窒素の除去が可能な高効率処理法である。

本法の運転方式には好気槽と無酸素槽を循環ポンプで循環させる循環式、および一槽で曝気・非曝気を制御する一槽間欠曝気式とがある。これまでの一槽式の研究成果として、友平ら¹⁾により、窒素除去に最適な曝気サイクルが明らかになり、循環式と同等の窒素除去率の達成に成功した。また、友平ら¹⁾、新井ら²⁾は、汚泥の引き抜きを行わない高濃度 MLSS での運転で、一定量の膜透過流束 (FLUX) を保ち、MLSS と FLUX 低下は無関係であることを報告している。

既存の標準活性汚泥法の施設を、こうした一槽式の膜分離活性汚泥法の施設に変更する場合、両者の反応槽は水理学的滞留時間 (HRT) が 6~8 時間であるため一般的に適用可能であると考えられる。しかし、大都市においては流入水量が大きい場合 HRT が 6 時間未満で運転されており、膜分離法の適用においても HRT を短縮する必要がある。この場合、処理水質と水量を維持するために、担体を反応槽内に投入することが有効である可能性がある。担体は反応槽内に投入されると、表面には硝化菌、内部には脱窒菌が高濃度に担持される。すると、硝化速度、脱窒速度が増大し、硝化反応、脱窒反応が促進されると考えられている³⁾。また、担体による膜面付着物層の剥離効果も起こりうる。したがって、一槽間欠曝気式膜分離活性汚泥法に担体を投入することにより、HRT を短縮した場合でも処理水質の向上と膜透過性能の確保が可能であることが期待される。

2. 目的

本研究では、反応槽に投入するための効果的な担体選定を行った。また、選定した担体を一槽間欠曝気式リアクターに投入し、有機物除去性能、窒素除去性能、膜透過性能に着目し、担体を投入する系としない系において、人工基質を用いて HRT を 6 時間と 4 時間の 2 種類設定し、4 系列の連続実験 (50 日間) を行い、運転状況を比較することで、HRT 短縮の可能性を検討する。また、現在未解明の課題である膜単独と膜+担体のリアクター性能の比較、担体による膜面付着物剥離効果を明確にする。さらに実下水を用いて、HRT を 6 時間に設定し、担体を投入する系としない系の 2 系列の連続運転 (50 日間) を行い、運転状況を比較することで、実際の施設への適用性を検討する。

3. 実験方法

3.1 担体選定

硝化速度、脱窒速度を測定し比較することで、担体選定を行った。試験方法は下水試験法⁴⁾に準じて行った。サンプリングは 0, 60, 120, 180 分の間隔、試験には、実用化されている 3 種類の結合固定化担体を使用した。また、結合固定化担体は馴養に 1~2 ヶ月間必要であるため⁵⁾、好気状態にて 2 ヶ月間馴養 (fill-and-draw 方式) したものをを使用した。担体添加率は約 30% で行った。また速度の算出には「担体利用処理技術マニュアル - 1994 年度版」⁶⁾の算定式を用いた。表 1、図 1 に各担体の特徴と外観を示す。

担体 a の形状は中空円筒状であるため、円筒内部と円筒表面に細菌を固定化する構造になっている。一方、担体 b、c の形状は立方体であるため、立方体内部と立方体表面に細菌を固定化する構造になっている。

3.2 連続運転

図2に実験装置の概略を示す。

有効容積20Lのリアクターに(株)クボタのMF膜(孔径0.45 μ m、0.11m²)を浸漬させ、曝気時のみポンプによる吸引ろ過を行い、基質には(株)王子コーンスターチのCSL(コーンスティープリカー)または実下水(長岡浄化センター、最初沈殿池越流水)を用い、表2に示す運転条件により連続実験を行った。

なお、1日1回のスポンジによる物理洗浄によりケーキ・ゲル層を剥離させ、膜間差圧の調節によりFLUXを保つようにした。投入担体については硝化・脱窒速度測定の結果から、担体cを用いて、担体添加率(担体体積/槽容積)10%で反応槽内に投入した。

3.3 分析項目

分析項目は、一般項目(pH、DO、ORP、水温)、汚泥性状(MLSS、MLVSS)、生物活性(アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、ケルダール性窒素、TOC)を測定した。また膜透過性能(FLUX、膜間差圧、膜面附着物)を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 担体選定

すべての担体は湿潤状態において比重が1.0(g/cm³)程度であるため、反応槽内では沈殿することなく、曝気によりスムーズに対流していた。

担体aを反応槽に投入したところ、膜を傷つけることはなかったが、固い材質であるため、長期間の運転では膜を傷つける可能性があると考えられた。

担体bの材質は水分を含んだ状態では、コンニャクのようなものであるため、膜を傷つける可能性は低いと考えられる。実際に反応槽に投入したところ、膜を傷つけることはなかった。

担体cの材質はスポンジのようなものであるため、膜を傷つける可能性は最も低いと考えられる。実際に反応槽に投入したところ、膜を傷つけることはなかった。

表1 担体の特徴

	担体a	担体b	担体c
材質	ポリプロピレン	ポリビニルホルマール	ポリウレタン
サイズ	4mm ^{OD} × 3mm ^{ID} × 5mm ^L	4mm角	12mm角
形状	中空円筒状	立方体	立方体
比重(g/cm ³)	1.01	1.018	約1.0



図1 担体の外観

図1 担体の外観

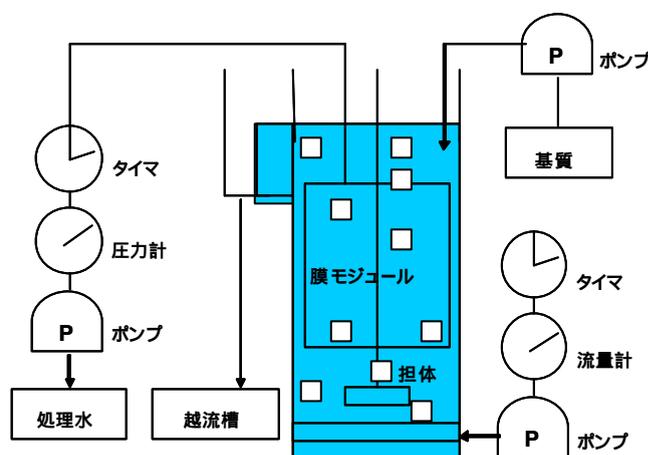


図2 実験装置の概略

表2 運転条件

	単位	run1 (有6)	run2 (無6)	run3 (有4)	run4 (無4)	run5	run6
HRT	hr	6	4	4		6	
膜数	枚	2	3			2	
FLUX	m/day	0.4					
曝気非曝気時間	min .min	30:30					
膜	種類	平膜					
	材質	ポリオレフィン					
	面積	0.11					
	孔径	0.4					
浮遊汚泥MLSS	mg/L	初期5,000(上限2,000)					
使用基質(主成分)		CSL			実下水		
流入TOC濃度	mg-C/L	250			56.9~70.7		
流入TN濃度	mg-N/L	65			33.0~36.9		
水温		20			11.2~14.5		
担体添加率	%	10		10		10	

表 3 に硝化速度、脱窒速度試験結果を示す。

表 3 試験結果

硝化速度は、担体 c は 17.62 (mg-N/L-担体・h) であり、他の 2 種類よりも大きいことが判明した。この理由として担体 c はスポンジのような材質であり、水分を多量に保持することが可能であるため、他の担体よりも多量の汚泥を保持したと考えられる。したがって、担体 c は硝化反応を効率的に行うことが可能になり、担体 c の硝化速度が最大になったと考えられる。

	担体附着汚泥MLSS (mg/L-担体)	硝化速度 (mg-N/L-担体 h)	脱窒速度 (mg-N/L-担体 h)
担体a	1385	8.09	38.99
担体b	2716	5.70	68.06
担体c	7518	17.62	68.06

脱窒速度は、担体 b、担体 c の脱窒速度は 68.06 (mg-N/L-担体・h) であり、担体 a よりも大きいことが判明した。この理由として、担体 b、担体 c の形状が立方体であることため、担体 a よりも担体内部を無酸素状態に保つことが有利である。したがって、好気条件での馴養の際に、脱窒菌を担体内部に保持したため、効率的な脱窒反応が可能になり、担体 b、担体 c の脱窒速度が大きくなったと考えられる。

以上の結果より、本研究において反応槽に投入するための効果的な担体は、担体 c ((株)西原環境テクノロジー、リンポーキューブ) であると考えられる。

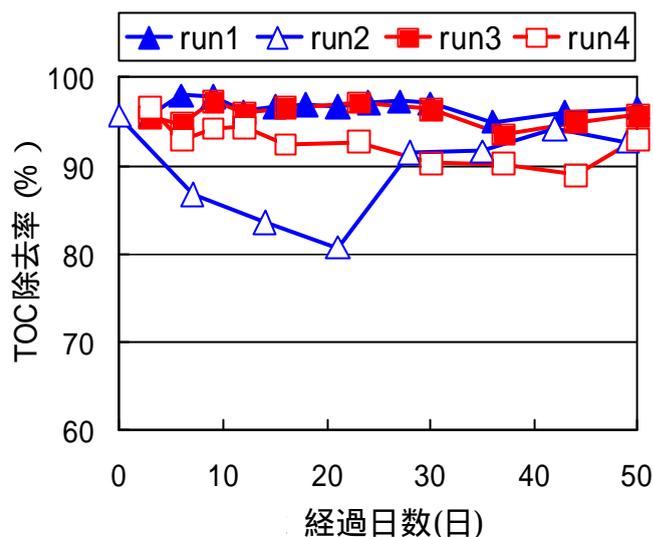


図 3 TOC 除去率の経日変化

4.2 人工基質における担体投入効果

4.2.1 有機物除去性能

運転期間中の TOC 除去率の経日変化を図 3 に示す。

運転が安定した状態 (運転開始 25 日目以降) での平均 TOC 除去率を比較すると、run1(有 6)、run2(無 6)、run3(有 4)、run4(無 4)は、それぞれ 96.7%、93.1%、95.8%、92.6%であるため、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽に比べ、高い TOC 除去率が得られた。

4.2.2 窒素除去性能

運転期間中の TN 除去率の経日変化を図 4、運転安定後の処理水の平均窒素濃度を図 5 に示す。

運転が安定した状態 (運転開始 25 日目以降) での平均 TN 除去率を比較すると run1(有 6)、run2(無 6)、run3(有 4)、run4(無 4)は、それぞれ 82.9%、78.0%、72.1%、60.6%であるため、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽に比べ、高い TN 除去率が得られた。また HRT を短縮 (6h → 4h) した場合、担体を投

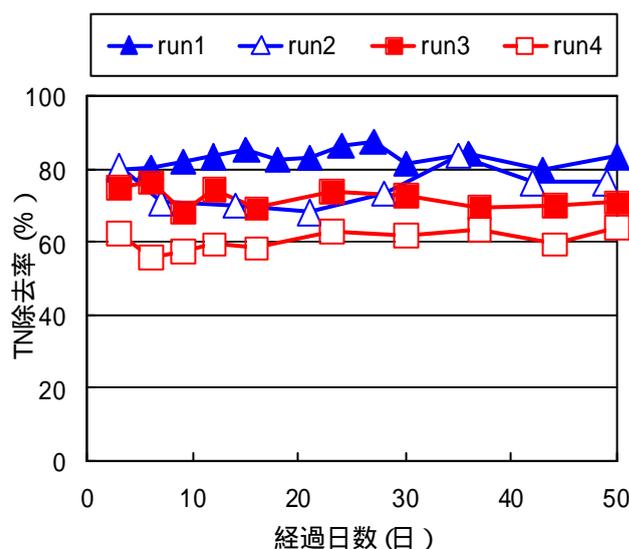


図 4 TN 除去率の経日変化

入した反応槽では、70%以上のTN除去率を保持していることから、担体投入により、HRT短縮の可能性が示された。処理水の平均窒素濃度から、HRTを短縮すると特にアンモニア性窒素が残存し、硝化が律速段階であったことが判明した。また、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽に比べ、アンモニア性窒素の残存が小さいため、効率的な硝化反応が進んでいると考えられる。

若山ら⁷⁾は担体を併用した循環式硝化脱窒法において、HRT4h(好気槽3h、無酸素槽1h)で連続運転した場合、平均TN除去率が69.7%を達成している。本研究ではHRT4hの運転でTN除去率が72.1%であることから、除去率は同程度であった。

4.2.3 膜透過性能

運転期間中の平均FLUXの経日変化を図6、膜間差圧の経日変化を図7に示す。

全運転期間中の平均FLUXはrun1(有6)、run2(無6)、run3(有4)、run4(無4)において、それぞれ0.386(m/day)、0.313(m/day)、0.396(m/day)、0.367(m/day)であるため、担体を投入したrun1(有6)、run3(有4)では運転期間中にFLUXが低下することなく、安定した運転を達成した。担体を投入していないrun2(無6)、run4(無4)では、運転開始30日を経過してからFLUXが低下する傾向が見られ、膜間差圧を上昇させても、FLUXを保持できなかった。

また、1日の膜面付着物量を測定したところ、run3(有4)、run4(無4)は、それぞれ268(mg-TS/m²)、720(mg-TS/m²)であり、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽の約40%の膜面付着物量であった。したがって反応槽に担体を投入することによる、膜面付着物の剥離効果が確認された。

4.3 実下水における担体投入効果

4.3.1 有機物除去性能

運転期間中のTOC除去率の経日変化を図8に示す。

運転が安定した状態(運転開始20日目以降)での平均TOC除去率を比較すると、run5、run6は、それぞれ87.0%、85.9%であるため、担体を投入した反応槽と、

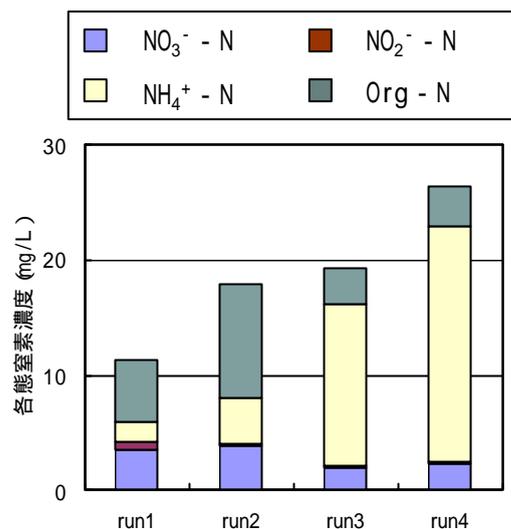


図5 処理水の平均窒素濃度

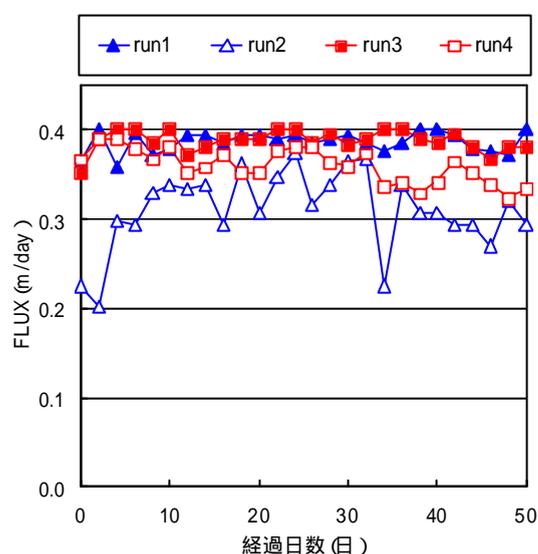


図6 FLUXの経日変化

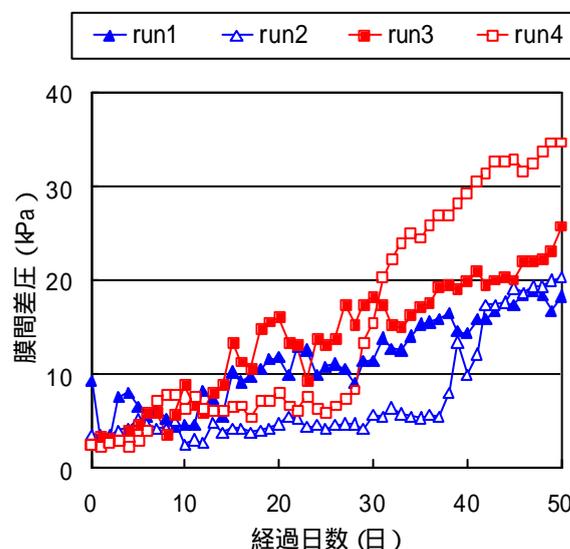


図7 膜間差圧の経日変化

担体を投入しない反応槽は同程度の TOC 除去率であり、担体の効果は確認できなかった。

4.3.2 窒素除去性能

運転期間中の TN 除去率の経日変化を図 9、処理水の平均窒素濃度を図 10 に示す。

運転が安定した状態（運転開始 20 日目以降）での平均 TN 除去率を比較すると run5、run6 は、それぞれ 62.6%、54.4% であるため、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽に比べ、高い TN 除去率が得られた。

処理水の平均窒素濃度から、担体を投入した反応槽は、担体を投入しない反応槽に比べ、アンモニア性窒素の残存が小さいため、効率的な硝化反応が進んでいると考えられる。

しかし、人工基質の系（HRT6h、担体有で TN 除去率 82.9%）と比較すると、低い TN 除去率であった。この原因として、水温が低かったことと、run5 では run1,3 とは異なり、担体の馴養を行わなかったことが考えられる。また、硝酸性窒素の残存が大きいことが判明した。この原因として実下水の系では、TOC/TN が低いいため、脱窒反応に不利であったことが一因として考えられる。

岸野ら⁸⁾は循環式膜分離活性汚泥法による実下水の処理において、HRT6h（好気槽 3h、無酸素槽 3h）で連続運転した場合、平均 TN 除去率が 83.3% を達成しており、より高い TN 除去率を得るため、今後運転方法を検討する必要がある。

4.3.3 膜透過性能

運転期間中の平均 FLUX の経日変化を図 11、膜間差圧の経日変化を図 12 に示す。

全運転期間の平均 FLUX は run5、run6 において、それぞれ 0.373 (m/day)、0.345 (m/day) であるため、担体を投入した run5 では運転期間中に FLUX が低下することなく、安定した運転を達成した。

膜間差圧は run5、run6 とともに大きな差は確認されなかった。また、人工基質の系と比較すると膜間差圧の上昇率が大きかった。この原因として、実下水の系で

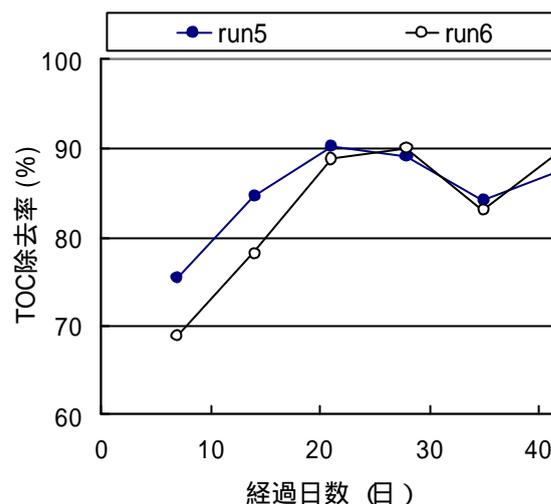


図 8 TOC 除去率の経日変化

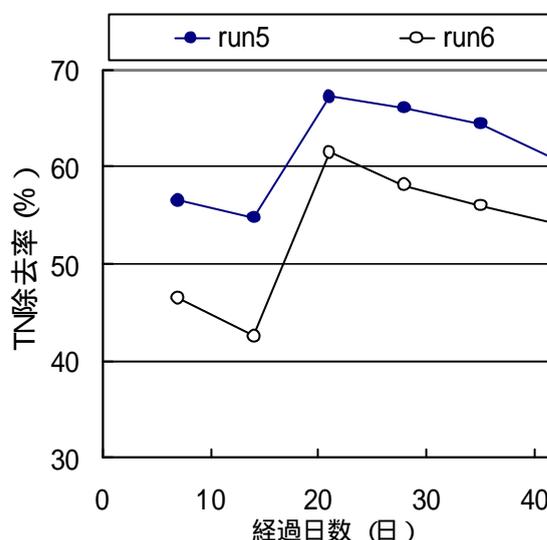


図 9 TN 除去率の経日変化

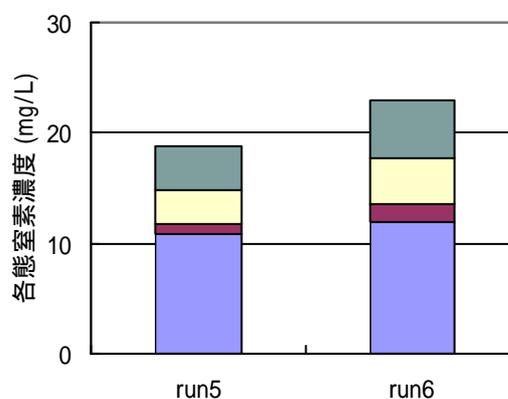
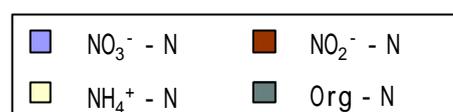


図 10 処理水の平均窒素濃度

は水温が低く、反応槽内汚泥の粘性が大きいことが一因と考えられる。

5. まとめ

本研究の主な結論は以下の通りである。

1) 担体選定

- ・硝化速度、脱窒速度試験の結果、および担体の形状、材質から反応槽に投入するのに効果的な担体が明らかになった。

2) 有機物除去能

- ・担体を投入した反応槽が、担体を投入しない反応槽に比べ、高い TOC 除去率を示した。

3) 窒素除去能

- ・担体を投入した反応槽が、担体を投入しない反応槽に比べ、特に硝化反応が効果的に進行したため、高い TN 除去率を示した。
- ・run3 の TN 除去率が 70% 以上達成していることから、担体投入することにより、HRT を短縮した場合にも、TN 除去率の大幅な低下を防げる可能性が示された。

4) 膜透過性能

- ・担体を投入した反応槽が、担体を投入しない反応槽に比べ、FLUX の保持に有利であった。
- ・担体を投入した反応槽は、担体の膜面付着物剥離効果により、膜面付着物量が少ないことが確認された。

5) 実下水の処理性能

- ・窒素除去能、膜透過性能ともに担体を投入した反応槽が良好な結果を示した。

参考文献

- 1) 友平尚男ら：一槽間欠曝気式膜分離法における曝気サイクルと容積負荷が窒素除去と膜透過性能に及ぼす影響、環境工学研究論文集、279-286、2002
- 2) 新井一仁ら：汚泥引抜きを伴わない膜分離活性汚泥法による実下水処理特性、第 28 回水環境学会年会講演集、326-327、1994
- 3) 海野肇ら：膜と担持微生物のハイブリット化による有機質・窒素同時除去に関する研究、平成 12 年度膜処理法を導入した小型生活排水処理装置の実用化に関する研究報告書、pp3-4、2001
- 4) 社団法人日本下水道協会：下水道試験法（上巻）、

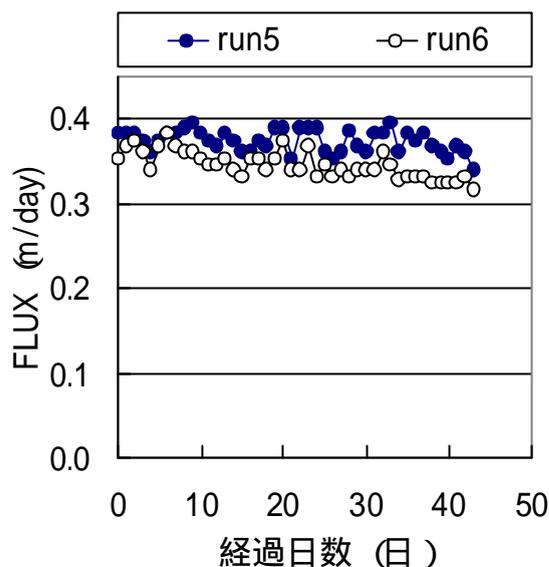


図 11 平均 FLUX の経日変化

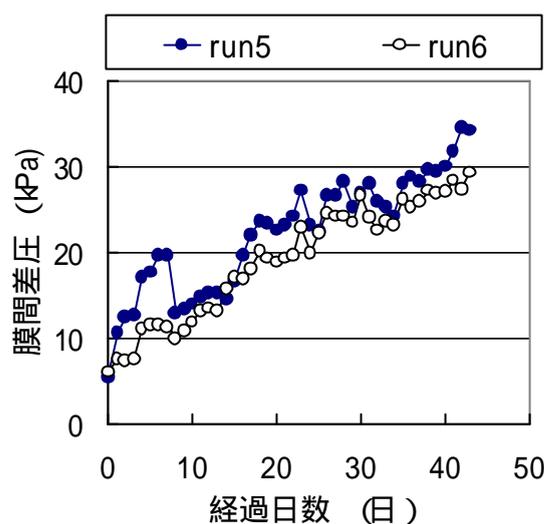


図 12 膜間差圧の経日変化

- pp283 ~ 285、pp269 ~ 272、1997
- 5) 財団法人下水道新技術推進機構：担体利用処理法技術マニュアル-1994年度版-、p17、1994
- 6) 吉田隆：微生物固定化法による水処理、株式会社エヌ・ティー・エス p92、2000
- 7) 若山正憲ら：担体供用硝化・脱窒プロセスにおける原水流動変動の安定性について、第 39 回下水道研究発表会講演集、pp608 ~ 610、2002
- 8) 岸野宏ら：膜分離活性汚泥法の維持管理コスト低減について、第 40 回下水道研究発表会講演集、pp703 ~ 708、2003