

一槽間欠曝気式膜分離活性汚泥法においてオンライン薬品洗浄がリアクター性能に及ぼす影響

廃棄物・有害物管理工学研究室 山口 司

指導教官 小松俊哉

藤田昌一

姫野修司

1. はじめに

膜分離活性汚泥法は、標準活性汚泥法における最終沈殿池での固液分離を膜ろ過で行う方法である。特徴として、反応槽内に汚泥を蓄積するため MLSS を高濃度に保持できる、パルキングの影響を受けない、HRT を短縮できるなどの特徴を持つ。しかし、問題点として、長期運転による膜目詰まりが挙げられる^{1)、2)}。この原因に菌体外高分子ポリマー（以下、ECP）が考えられている。

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と一槽で曝気・非曝気をタイマー制御する一槽間欠曝気式とがある。昨年度、友平ら³⁾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、有機物除去率の達成に成功した。また、竹田ら⁴⁾、中村ら⁵⁾は、曝気時間自動制御装置を用いることで、高い窒素除去率を得ており、本法が期待されている。新井ら⁶⁾、工藤ら⁷⁾も、間欠曝気が ECP の分解を促進し、膜目詰まりを抑制するとしている。また、友平ら³⁾、新井ら⁶⁾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 FLUX を保ち、MLSS と FLUX 低下は無関係であることが報告されている。

膜目詰まりの除去には、膜を浸漬させたまま洗浄を行うオンライン薬品洗浄が一般的であるが、薬品を反応槽内に直接暴露することによる有機物除去性能、窒素除去性能への影響についての検討は十分に行われていない。

そこで本研究は、一槽間欠曝気式膜分離装置を用いて、低 MLSS 系および高 MLSS 系について、オンライン薬品洗浄を行い、膜透過性能の回復効果について検討を行い、薬品浸漬法との比較を行った。また、薬品を反応槽内に直接暴露することによる生物活性および汚泥性状への影響について検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験条件

図1に実験装置の概略を示す。有効容積 20 L のリアクターに(株)クボタの MF 膜（材質ポリオレフィン、孔径 0.45 μm 、225 mm x 315 mm、0.11 m^2 ）を浸漬させ、曝気時のみポンプによる吸引ろ過を行った。なお、1日1回のスポンジによる物理的洗浄によりケーキ・ゲル層を剥離させた。

また、実機では通常、ある一定の膜間差圧に達した時点でオンライン薬品洗浄を行う。その範囲も 10 ~ 80 kPa と広範囲であり、本研究では、膜間差圧が 20 kPa に達した時点でオンライン薬品洗浄により膜間差圧を調節する定量ろ過を行うことで FLUX を保つようにした。

2.2 基質および植種汚泥

基質には(株)王子コーンスターチの CSL（コーンステープリカー）を希釈して用いた。また、pH 調整のため適宜 NaHCO_3 も添加した。

植種汚泥は、公共下水処理場の返送汚泥を最初の植種源とし、fill & draw により基質に長期間馴養させたものを用い、各 RUN 開始時には、MLSS を 5000 mg/L に調整し、新たに投入した。

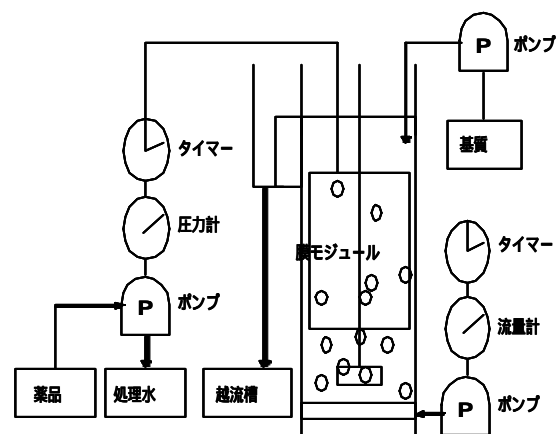


図1 実験装置の概略

2.3 運転方法

本研究では90日間の連続実験を行った。送液ポンプ(マスターフレックス社製、PA-21A)を用いて常時流入させた。曝気サイクルについては友平ら³⁾の結果を参考にした。リアクターを設置した実験室は20℃恒温室のため、反応槽内の水温は20±2℃、pHは7~8程度であった。水理学的滞留時間(HRT)を6hとし、FLUXを0.37 m/dayとした。

1日1回、膜を取り出してスポンジ洗浄を行い、洗浄後の膜間差圧が20kPaに達した時点でオンライン薬品洗浄を行った。薬品洗浄時には、洗浄直後、6時間後、12時間後、24時間後についてもサンプリングを行い、経時変化についても調査することで短期的な視点からの調査を行うことで、薬品による生物活性への影響を検討した。

連続実験は表1に示すとおり、汚泥引拔を6日に1回行い、MLSSを5000 mg/Lに調整した低 MLSS 系の Control-L、RUN1、RUN2 および MLSS を 20000 mg/L に設定した高 MLSS 系の Control-H、RUN3、RUN4 を行った。オンライン薬品洗浄に用いる薬品は、有機物除去には次亜塩素酸ナトリウム、水酸化ナトリウム、過酸化水素水など、無機物除去にはシュウ酸、塩酸、硫酸などが用いられるのが一般的²⁾であり、本研究においては予備実験の結果より、RUN1 および RUN3 には次亜塩素酸ナトリウム(有効塩素 8%) 0.5%+シュウ酸 0.1%、RUN2 および RUN4 には水酸化ナトリウム 0.05%+シュウ酸 0.1%を用いた。

洗浄時は、リアクターの曝気および吸引を停止して行った。まず、有機物目詰まりを除去するため、次亜塩素酸ナトリウムあるいは水酸化ナトリウムをそれぞれ1L逆洗させ、1時間放置した後、無機物目詰まりを除去するため、シュウ酸を1L逆洗させ、再び1時間放置した後、リアクターの運転を再開させた。薬品洗浄による窒素除去性能および有機物除去性能への影響については、薬品洗浄を行わない Control 系と薬品洗浄を行う RUN との比較、洗浄時の経時変化(洗浄直後から24時間後まで)の平均と運転期間中の経日変化(7日に1回測定)の平均から検討を行った。

表1 運転条件

	Control-L	RUN1	RUN2	Control-H	RUN3	RUN4
設定MLSS(mg/L)	5000			初期:5000(上限20000)		
HRT(hr)	6					
基質TOC(mg-TOC/L)	250					
基質TN(mg-TN/L)	65					
設定膜透過流束(m/day)	0.37					
曝気線速度(m/min)	0.84					
曝気:非曝気(min:min)	30:30					
薬品洗浄	洗浄なし	NaClO 0.5%	NaOH 0.04%	洗浄なし	NaClO 0.5%	NaOH 0.04%
		COOH ₂ 0.1%	COOH ₂ 0.1%		COOH ₂ 0.1%	COOH ₂ 0.1%

2.4 洗浄効果の評価方法

実機では一般的に、洗浄効果を清水 FLUX による回復率²⁾から評価を行っており、その評価方法を以下に述べる。

$$\text{清水FLUXによる回復率(\%)} = \frac{\text{洗浄後の清水FLUX}}{\text{新膜の清水FLUX}} \times 100(\%)$$

実機における反応槽内には数十枚~数百枚で構成されたユニットがあり、このユニットが数個~数十個存在する。薬品洗浄もユニットごとに行われており、回復率についてもユニットごとに反応槽から取り出して清水 FLUX を測定し、残りのユニットは通常どおり稼働している。しかしながら、本研究における一槽間欠曝気式リアクターにおいては、浸漬させている膜は2枚であり、薬品洗浄も2枚同時に行っているため、清水 FLUX を測定している間、運転を停止させる必要があるため、90日間の運転終了後、膜間差圧が20kPaに達していなくとも、オンライン薬品洗浄を行い、評価を行った。

2.5 分析項目

測定項目は、一般項目(pH、DO、ORP、水温)、汚泥性状(MLSS、MLVSS、ECP)、生物活性(窒素除去性能、有機物除去性能、硝化速度、脱窒速度、酸素利用速度)とし、一般項目については1日1回、その他については週1回、測定を行った。

窒素濃度および有機物濃度については、基質、好気状態時、無酸素状態時、処理水について測定を行った。好気状態時、無酸素状態時においては、それぞれ 25～30 分経過時にサンプリングを行った。

また、汚泥部分からの ECP 抽出には、水蒸気抽出法を用いた。オートクレーブによる滅菌処理（105、30 min）を行った後、高速遠心分離機（15000 rpm、10 min）にかけ、上澄液を 0.45 μm のメンブレンフィルターで濾過したものを TOC-500 で測定を行った。

3. 実験結果および考察（低 MLSS 系）

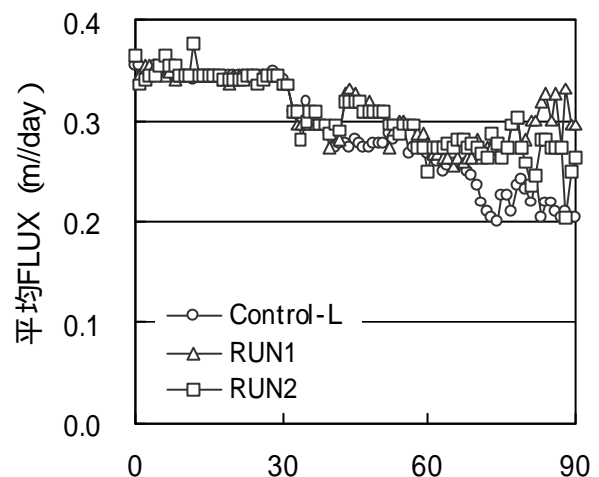
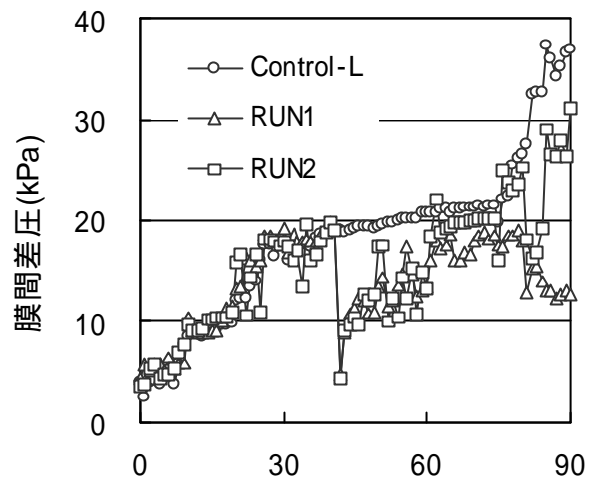
3.1 薬品洗浄が膜透過性能に及ぼす影響

90 日間の連続実験における膜間差圧および平均 FLUX の経日変化を図 2 および図 3 に示す。

すべての RUN において運転開始 30 日を経過した付近から平均 FLUX が低下する傾向が見られたため膜間差圧を上昇させ、FLUX を維持しようとしたが、FLUX の回復は見られず、RUN1、RUN2 では運転開始 41 日目および 82 日目にスポンジ洗浄後の膜間差圧が約 20 kPa に達したため、予備実験より決定した薬品を用いて薬品洗浄を行った。

運転期間中の平均 FLUX の比較をしてみると、1 回目の薬品洗浄を行うまでの 0～41 日目の期間では、Control-L で 0.335 m/day、RUN1 で 0.334 m/day、RUN2 で 0.335 m/day と差はほとんどなかった。1 回目の薬品洗浄から 2 回目の薬品洗浄までの 42～81 日目までの期間では Control-L で 0.256 m/day、RUN1 で 0.287 m/day、RUN2 で 0.286 m/day、2 回目の薬品洗浄から運転終了までの 82～90 日目までの期間では Control-L で 0.213 m/day、RUN1 で 0.308 m/day、RUN2 で 0.261 m/day であった。

薬品洗浄を行わなかった Control-L では平均 FLUX が低下し続ける結果となった。薬品洗浄を行った RUN1、RUN2 では薬品洗浄時に膜透過性能は回復するものの、洗浄 40 日後に再び 20 kPa に達した。



また、RUN2 においては、2 回目の薬品洗浄後、7 日程度の間膜間差圧は 30 kPa まで上昇した。

薬品洗浄による回復率においては、清水 FLUX による回復率が、薬品浸漬法で 87.1%、RUN1 で 75.3%、RUN2 で 47.1% となったことから、RUN2 のように膜間差圧が上昇し、過度の膜目詰まりが生じれば、薬品洗浄による膜透過性能の回復は低いことがわかった。

3.2 生物活性に及ぼす影響

運転期間中の窒素除去率の経日変化を図 4 に示す。平均値はそれぞれ RUN1 で 75.3%、RUN2 で 74.0%となり、Control-L で 74.9%であり、薬品による窒素除去性能への影響は見られなかった。また、薬品洗浄時の経時変化を見ても、平均値ではそれぞれ RUN1 で 72.0%、RUN2 で 74.7%であり、短期的にも長期的にも薬品による影響を受けることなく、運転期間中、安定した処理水質を得ることができた。

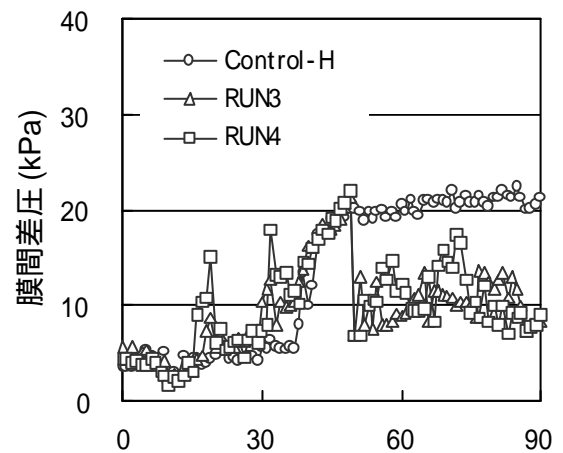
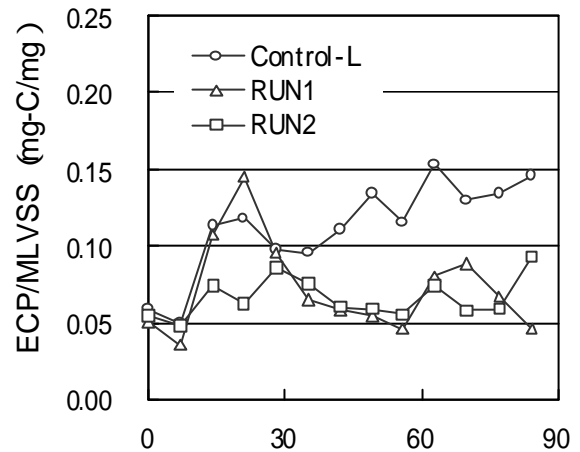
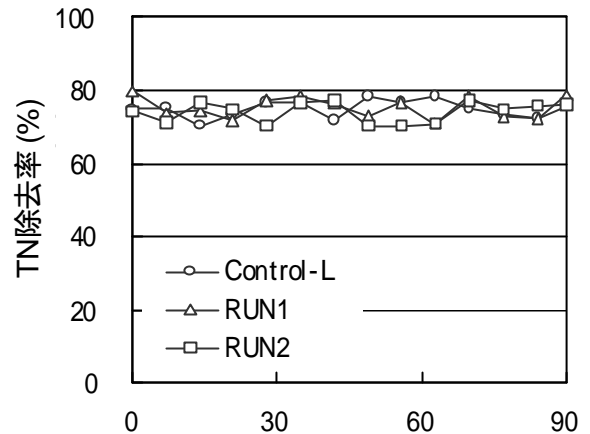
有機物除去性能についても同様に、薬品による有機物除去性能への影響は見られず、運転期間中の平均値は RUN1 で 94.4%、RUN2 で 95.2%となり、Control-L で 94.8%であった。薬品洗浄時の経時変化は有機物除去率の平均値はそれぞれ RUN1 で 92.2%、RUN2 で 91.7%となり、短期的にも長期的にも薬品による生物活性の低下は見られなかった。

予備実験において、硝化速度、脱窒速度、酸素利用速度に影響を及ぼす濃度について検討を行ったが、硝化に及ぼす影響が最も大きく、その濃度は、次亜塩素酸ナトリウム 1 g/kg-MLSS、水酸化ナトリウム 1 g/kg-MLSS、シュウ酸 4 g/kg-MLSS であった。

反応槽内へ全てが均等に溶解したと仮定すると、次亜塩素酸ナトリウム 0.2 g/kg-MLSS、水酸化ナトリウム 0.02 g/kg-MLSS、シュウ酸 0.04 g/kg-MLSS となり、最大値でも、予備実験で明らかになった阻害を及ぼす濃度の 20 %程度になったことが生物活性が低下しなかった原因であると考えられる。

膜目詰まりの原因と考えられている ECP 含有量については、汚泥引抜を行っているにもかかわらず、Control では経過日数とともに増加する傾向が見られたが、薬品洗浄を行った RUN1、RUN2 では薬品洗浄以降、ECP 含有量が一時的に減少する現象が見られ粘性を表わすと考えられる ECP/MLVSS の経日変化においても同様の現象が見られた (図 5)。

このことから、薬品洗浄は汚泥の可溶化を引き起こすことが確認でき、洗浄時の膜透過性能の回復に加え、粘性を低く維持することで膜詰まりの進行を抑制する作用が確認できた。



4. 実験結果および考察 (高 MLSS 系)

4.1 薬品洗浄が膜透過性能に及ぼす影響

90 日間の連続実験における膜間差圧および平均 FLUX の経日変化を図 6 および図 7 に示す。

運転期間中の平均 FLUX の比較をしてみると、1 回目の薬品洗浄を行うまでの 0~49 日目の期間では、Control-H で 0.313 m/day、RUN3 で 0.308 m/day、RUN4 で 0.319 m/day と差はほとんどなかった。薬品洗浄から運転終了までの 50~90 日目までの期間では Control-H で 0.281 m/day、RUN3 で 0.307 m/day、RUN4 で 0.319 m/day であった。低 MLSS 系と比較すると、RUN3、RUN4 では薬品洗浄時の膜透過性能の回復も大きく、洗浄後も膜間差圧は 10 kPa 付近と低い状態で運転終了の 90 日目まで維持できた。

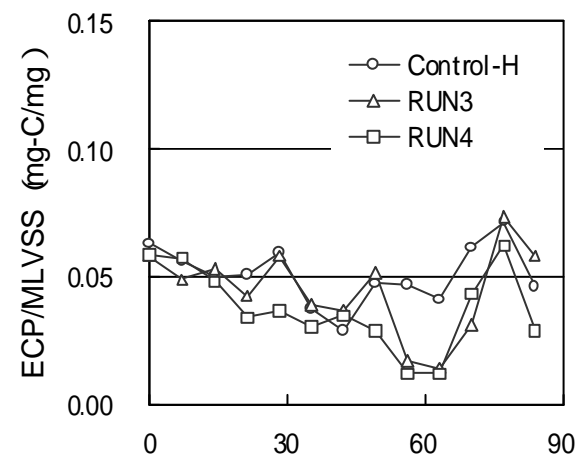
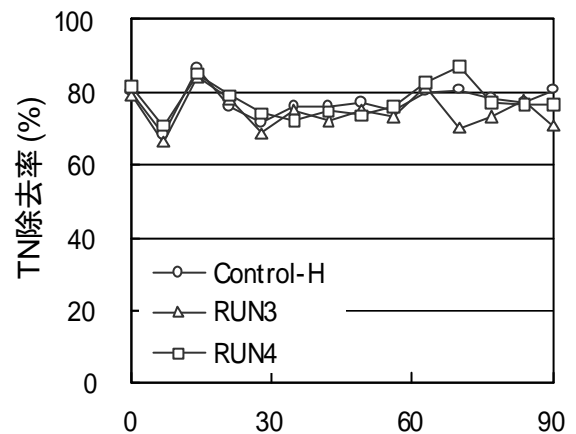
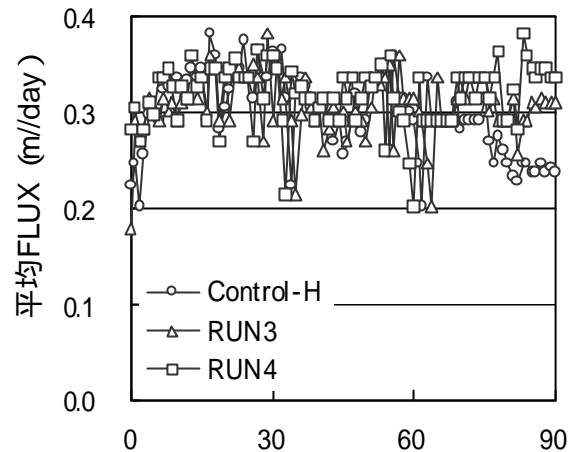
薬品洗浄による回復率は、薬品浸漬法で 91.8 %、RUN3 で 85.9 %、RUN4 で 75.3 % となり、低 MLSS 系と比べ、高い回復率となった。

以上のことから、高 MLSS 系が低 MLSS 系に比べ、膜透過性能が高く、有利であることが示唆された。

4.2 生物活性に及ぼす影響

運転期間中の窒素除去率の経日変化を図 8 に示す。低 MLSS 系と同様、薬品による窒素除去性能への影響は見られず、窒素除去率の平均値はそれぞれ RUN3 で 76.0 %、RUN2 で 77.0 % となり、Control-L で 75.0 % であった。薬品洗浄時の経時変化の平均値も RUN3 で 72.6 %、RUN4 で 72.5 % となり、短期的にも長期的にも薬品による影響を受けることなく、運転期間中、安定した処理水質が得られた。また、低 MLSS 系と比べ、高い窒素除去率が得られた。有機物除去性能についても同様の結果が得られた。

この原因として、薬品が反応槽内へ全てが均等に溶解したと仮定すると、次亜塩素酸ナトリウム 0.04 g/kg-MLSS、水酸化ナトリウム 0.005 g/kg-MLSS、シュウ酸 0.01 g/kg-MLSS となり、低 MLSS 系と同様に、最大値でも予備実験で明らかになった阻害を及ぼす濃度の 5 % 程度と、低濃度であったことが考えられる。



目詰まりの原因と考えられている ECP 含有量については、低 MLSS 系と同様、薬品洗浄を行った RUN3、RUN4 では薬品洗浄以降、ECP 含有量が一時的に減少し、粘性を低下させることができた(図 9)。このことから、薬品洗浄による汚泥の可溶化も確認できた。また、運転期間中の粘性は、低 MLSS 系に比べ、高 MLSS 系では低い状態で運転することができた。

以上から、薬品洗浄は汚泥の可溶化効果を引き起こすことに加え、高 MLSS 系は低 MLSS 系と比べて粘性が低い状態で運転することで膜目詰まりの進行を抑制する作用が明らかとなった。

5. まとめ

1) オンライン薬品洗浄により膜目詰まりの原因と考えられる ECP 含有量が減少し、反応槽内の粘性を低く保つことで、膜目詰まりの抑制し、安定した FLUX を得ることができた。

2) オンライン薬品洗浄を行った RUN の窒素除去性能、有機物除去性能は、薬品洗浄時の経時変化、運転期間中の経日変化ともに安定しており、短期的にも長期的にも薬品による窒素除去性能および有機物除去性能への影響は見られなかった。

3) オンライン薬品洗浄を従来の薬品浸漬法と比較すると、作業効率が高まるほか、同等の回復率を得ることができ、膜洗浄方法として実用性の高いことが実証された。

4) 高 MLSS 系での運転は、低 MLSS 系に比べ、膜透過性能、窒素除去性能において有利であり、粘性を低い状態で運転することができ、洗浄後の膜間差圧の上昇も緩やかであったことから、一槽間欠曝気式膜分離活性汚泥法におけるリアクター性能は非常に優れていた。

参考文献

1) 藤田賢二ら：急速濾過・生物濾過・膜濾過、技報堂出版、274-275、1994

2) 吉田隆：膜を利用した新しい水処理、2000

3) 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

4) 竹田茂ら：間欠ばっ気およびばっ気時間制御運転による合併処理浄化槽の窒素除去、第 28 回水環境学会年会講演集、262-263

5) 中村智明ら：ばっ気時間自動制御装置を用いた膜分離間欠ばっ気活性汚泥方式の窒素除去特性、浄化槽研究、vol.13、No.2、17-24、2001

6) 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

7) 工藤千里ら：槽浸漬型膜分離活性汚泥法における窒素除去特性、第 35 回環境工学フォーラム講演集、126-128、1998