

〈研究発表〉

高速移床式脱窒ろ過器における有機物注入制御とその効果

福 沢 正 伸¹⁾, 土 井 知 之¹⁾, 和 田 直 也²⁾

日 下 部 武 敏²⁾, 清 水 芳 久²⁾

¹⁾ 株式会社タクマ 水処理技術部 (〒660-0806 尼崎市金楽寺町2-2-33 E-mail: fukuzawa@takuma.co.jp)

²⁾ 京都大学 大学院工学研究科附属 流域圏総合環境質研究センター
(〒520-0811 大津市由美浜1-2 E-mail: shimizu@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

概 要

閉鎖性水域の水質改善を目的とした窒素規制への対応として、下水処理場では水処理への生物学的硝化脱窒法の導入が進められている。同法は標準活性汚泥法と比べて滞留時間が長いいため広い用地が必要となるが、都市部では用地を確保できない狭小な下水処理場が少なくない。演者らは、省スペースでSS・窒素を高度に同時除去が可能である高速移床式脱窒ろ過器を用いて実証試験を実施した。その結果、原水（終沈越流水）の硝酸性窒素と溶存酸素濃度をオンライン測定し、有機物（メタノール）注入制御を行うことで、目標水質の達成と経済的な運転が可能であることを確認した。

キーワード：急速ろ過，脱窒ろ過法，生物学的窒素除去，高速移床式脱窒ろ過器

1. は じ め に

閉鎖性水域の水質改善のため、下水処理場の放流水に対する窒素・りん規制は年々厳しくなっており、水処理の高度処理化の必要性が高まっている。

下水の窒素除去技術は、循環式硝化脱窒法やステップ流入式多段硝化脱窒法など反応タンクに関する技術が確立されているが、これらの高度処理方式は従来の標準活性汚泥法と比べて、建設・運転コストが高く、スペースの拡張を伴うため、用地の少ない都市部では、早期に導入するのが難しいだけでなく、将来のより厳しい窒素規制に対応するのは困難である。

一方、省スペースで窒素除去が可能な処理技術として、上向流移床式砂ろ過に窒素除去機能を付加した脱窒ろ過法がある。これまで、パイロットプラントでのろ過速度 (LV) 400 m/日までの窒素除去性能の確認¹⁾、脱窒型に改造した処理量 10,000 m³/日の実設備による実証試験^{2,3)}等が行われてきた。

本報では、パイロットプラントによる実証試験を行い、更なる省スペース化が可能である高速移床式脱窒ろ過器 (LV450~700 m/日) の処理特性および有機物注入制御の効果について検討した結果を報告する。

2. 移床式脱窒ろ過法

移床式砂ろ過とは、ろ材の連続洗浄方式を特長とした砂ろ過方式で、ろ過工程と洗浄工程が常時並行して行われるため、連続運転が可能である。洗浄工程は、

SSを捕捉したろ過器下部のろ材を連続的に少量ずつエアリフトポンプにより揚砂しながら空気洗浄（一次洗浄）し、サンドウォッシュャによる水洗浄（二次洗浄）した後、ろ材はろ層上部へと戻るといふ順に行われる (Fig. 1)。下水処理場の高度処理設備や再生水の造水設備等として多数の稼働実績がある。

脱窒ろ過法は、この砂ろ過においてSSのみでなく、有機物添加により窒素も同時に除去を行うものである。SSは通常のスルットと同様、ろ層を通過する間にろ層にて捕捉される。また、砂の表面に付着した脱窒細菌により、硝酸性窒素 (NO₃-N) の除去が行われる。

脱窒反応は従属栄養細菌によってNO₃-Nから窒素ガスに変換する還元反応であるため、水素供与体である有機物が存在し、無酸素状態の時に進行する。反応タンクでは流入下水中の有機物 (BOD) 除去とアンモニア (NH₄-N) の硝化が進行するため、最終沈殿池越流水に有機物はほとんど残っていない。脱窒ろ過法では、有機物を原水に注入することでろ過器にて脱窒反応を行うことが可能となる。

3. 実 験 方 法

3.1 実験装置

(1) 実験設備

実証試験はA下水処理場にて平成24年2月から同年6月に実施した。原水には、標準活性汚泥法の処理系列の終沈越流水を使用した。実験設備の構成は、原水ポンプ、高速移床式脱窒ろ過器、ろ材の洗浄用空気

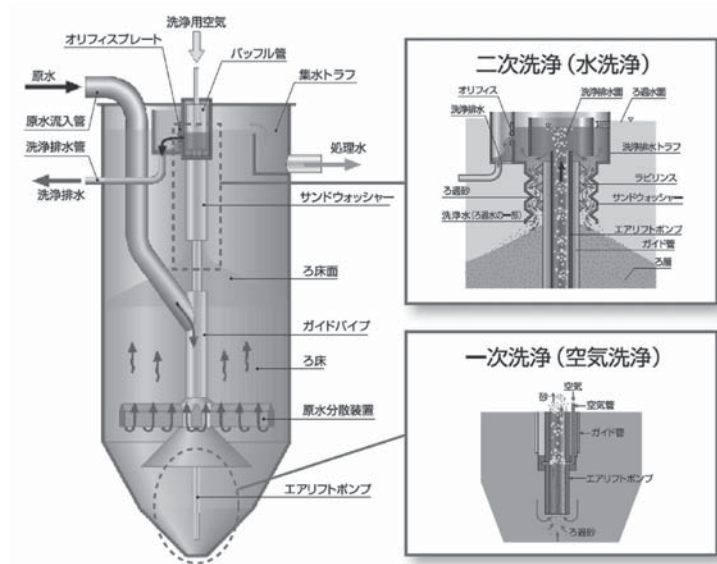


Fig. 1: Up-flow moving bed sand filtration

源 (コンプレッサ), 有機物注入設備である。

本研究で使用した高速移床式脱窒ろ過器は, 従来の移床式をベースに洗浄装置の大容量化やろ層の最適化により LV700 m/日に対応可能な設備であり, ろ過面積は 0.5 m² である。ろ材には粒径 1 mm 程度の珪砂, 有機物には下水処理で使用実績のあるメタノールをそれぞれ使用した。

(2) 有機物注入制御システム

脱窒に必要なメタノール量は, 原水の NO₃-N 濃度, NO₂-N 濃度, DO 濃度によって変化する。今回の終沈越流水には NO₂-N がほとんど存在しないことから, McCarty の実験式⁴⁾から NO₂-N 濃度の項を除き, 補正係数を考慮した(1)式を用いた。

$$\text{メタノール注入量}(mg/L) = [a \cdot (\text{原水}NO_3 - \text{目標}NO_3) + b \cdot \text{原水}DO] \cdot \alpha \quad (1)$$

ここで, a, b: 係数, α: 補正係数

本研究では目標 NO₃-N 設定値を設定し, それに対する原水 (終沈越流水) NO₃-N 濃度の差分についてメタノール注入を行った。

有機物注入制御システムの構成を Fig. 2 に示す。構成機器は, 原水オンライン測定用の溶存酸素濃度計 (隔膜式, HACH 製), 浸漬型硝酸濃度計 (UV 吸光式, HACH 製), および流量計 (電磁式, 東芝製) であり, 原水水質に基づいたフィードフォワード (FF) 制御を行った。FF 制御は原水水質の変動に対する追従性に優れた制御方式¹⁾であることから採用した。

なお, 今回使用した UV 式硝酸濃度計は, NO₃-N と NO₂-N の合算値 (NO_x) で測定される。これは, NO₃-N と NO₂-N の吸光波長がいずれも 210 nm 付近

であり, 個別濃度として判別できないためである。しかし, 前述のように, 終沈越流水中には NO₂-N がほとんど含まれていないため, 測定値を NO₃-N 濃度として制御に用いても実用上問題ないと判断した。

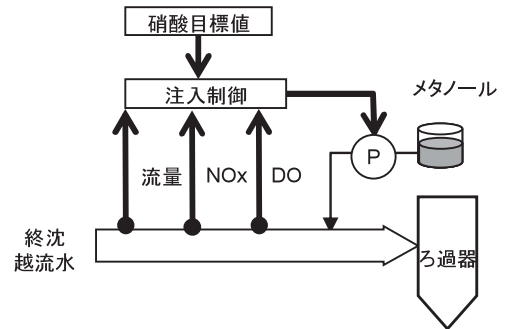


Fig. 2: Schematic diagram of Methanol injection control system on denitrification-type sand filtration

3.2 目標硝酸濃度設定値

下水処理水の窒素規制は全窒素 (T-N) が対象であるため, 脱窒ろ過の目標 NO₃-N 設定値は処理水の窒素組成を考慮する必要がある。

A 処理場の反応タンクでは硝化運転が行われているため, 終沈越流水中の窒素形態の多くは NO₃-N であり, NH₄-N と NO₂-N はほとんど検出されず, その他の窒素 (Org-N 等) が 1 mg/L 程度ある。分析の結果, その他の窒素は溶解性成分が多く, ろ過による除去はほとんど期待できないと考えられた。したがって, 処理水の T-N 目標に対して, 制御の目標 NO₃-N 設定値はその他の窒素を考慮して 1 mg/L 低い値とした。

3.3 実験条件

実験条件を **Table. 1** に示す。LV450 m/日において、各 T-N 目標達成のため、(1)式の目標 $\text{NO}_3\text{-N}$ 値を変化させ、処理特性の検討および有機物注入制御の効果を確認した。

特に、RUN1 では現実的な T-N 目標である 5 mg/L を想定し、目標 $\text{NO}_3\text{-N}$ 設定値を 4 mg/L とし、冬の低水温期に実施した。RUN4 では、目標 $\text{NO}_3\text{-N}$ 設定値を 1 mg/L と低い値に設定して実施した。

また、流入下水量の時間変動によるろ過速度の増減を想定して、LV450 m/日から LV700 m/日に変動させた時の処理状況についても評価を行った。

Table.1: The settings of parameter

RUN	期間	目標 $\text{NO}_3\text{-N}$ 設定値 [mg/L]	T-N 目標 [mg/L]
1	2月~4月前半	4	5
2	4月後半	2	3
3	5月	3	4
4	6月	1	2

4. 実験結果

4.1 処理特性

試験中の処理状況 (**Fig. 3**) について以下に述べる。

(1) 窒素除去

Table. 2 に示した窒素濃度の結果から、LV450 m/日において原水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が変動しても、目標値に近いろ過水質が得られ、有機物注入制御は有効に機能した。

また、脱窒ろ過による $\text{NO}_3\text{-N}$ 除去で、ろ過水 T-N 濃度も概ね目標値を満足することができた。さらに、20℃以下の低水温期においても、ほぼ目標通りの性能が得られ、ろ過水窒素濃度をコントロール可能であった。

Table.2: Concentration of nitrogen

RUN	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)		T-N (mg/L)	
	原水	ろ過水	原水	ろ過水
1	7.2 (1.6)	3.5 (0.6)	8.3 (1.7)	4.7 (0.8)
2	5.3 (0.6)	1.4 (0.3)	- (-)	- (-)
3	6.0 (1.4)	2.4 (0.2)	7.9 (0.5)	3.3 (0.2)
4	5.0 (1.4)	0.9 (0.5)	7.0 (0.5)	2.2 (0.8)

※ 上段: 平均値、下段: 標準偏差

(2) SS 除去

脱窒ろ過運転時は注入する有機物により生物膜等が発生し、SS 負荷が増加し、処理に悪影響を及ぼす可能性が考えられる。しかし、取得したデータでは、

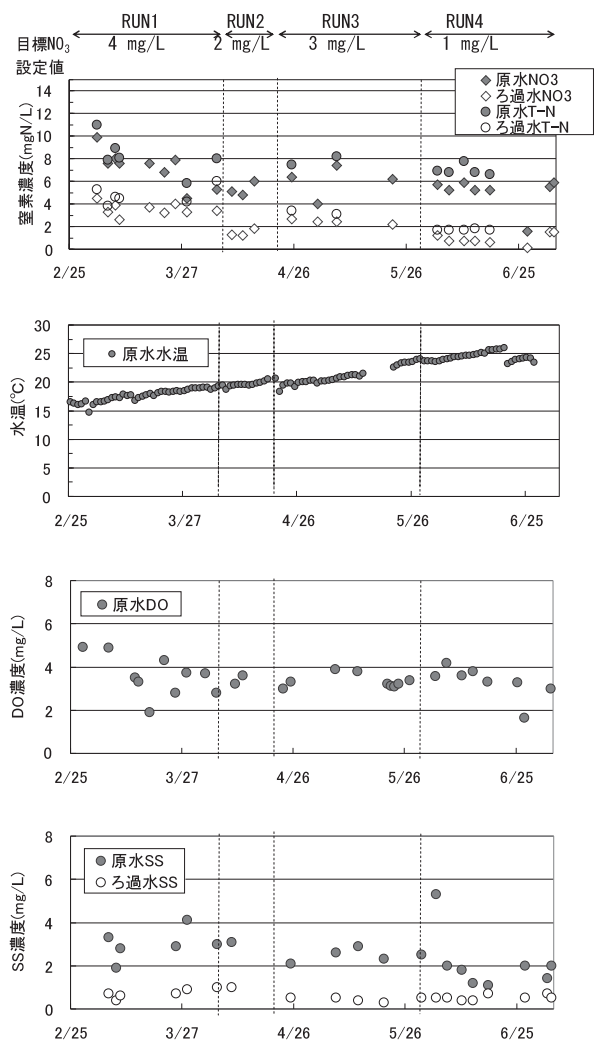


Fig.3: Results of denitrification treatment (LV450 m/d)

SS 濃度は原水 1.0~5.3 mg/L に対し、ろ過水は平均 0.5 mg/L を示した。

以上より、原水 SS 濃度変動および制御による有機物注入量の増減に対しても、安定して高度な SS 除去が可能であることが示された。

(3) BOD 除去

脱窒ろ過で添加する有機物は脱窒反応により分解される。ただし、添加した有機物が十分に利用されなかった場合、BOD が増加する可能性があり、有機物注入制御システムには一定の精度が求められる。

これに対して、各 RUN の BOD₅ 平均除去率は RUN1~4 の順に、37%、35%、65%、45% であり、いずれの条件においても BOD が増加することはなかった。また、低い目標 $\text{NO}_3\text{-N}$ 設定値で運転を行った RUN4 においても、その他の RUN と同様に BOD₅ 除去効果が認められた。さらに、ろ過水中の残留メタノールについても分析を行ったが 1 mg/L 以下 (検出限界以下) であった。

以上の結果より、本制御システムは脱窒ろ過法を制御するのに十分な精度を有しており、過不足のない有

機物注入が可能であることを確認した。

4.2 ろ過速度 700 m/日の処理特性

流入下水量の時間変動によるろ過速度の増減を想定して、LV450 m/日からLV700 m/日まで段階的にろ過速度を増加させて運転を行った。NO₃-N 目標値を 1 mg/L に設定したときの、ろ過速度および窒素濃度の経時変化を Fig. 4 に示す。

LV700 m/日運転時のろ過水 NO₃-N 濃度は 1 mg/L 程度を示し、LV450 m/日運転時と同等であった。

以上より、LV700 m/日でも窒素除去が十分可能であり、流量変動に対して良好な処理追従性を有することを確認した。

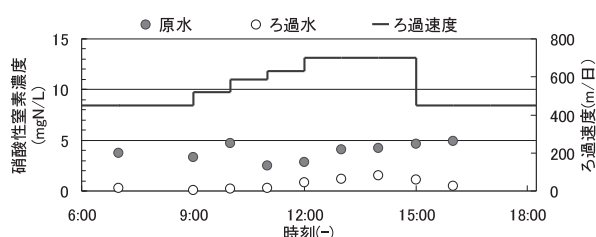


Fig. 4: Result of denitrification treatment (LV700 m/d)

4.3 FF 制御による有機物注入量削減効果

FF 制御によるメタノール注入量の削減効果を、定量注入の場合と比較して、以下の条件にて試算した。

試算条件は、処理水量 50,000 m³/日、原水の NO_x-N および DO 濃度は 2013 年 2 月のオンライン測定結果 (Fig. 5) を用いた。FF 制御では、(1) 式の目標 NO₃-N 濃度を 4 mg/L と仮定した。

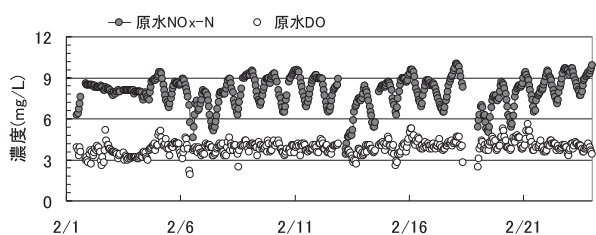


Fig. 5: Result of On-line Measurement (Influent Concentration)

定量注入の注入率は、ろ過水の NO₃-N 濃度が目標値を上回ることがないように、期間内の NO₃-N および DO 濃度の最大値に合わせることにした。2 月の原水 NO_x-N 濃度および DO 濃度の最大値はそれぞれ 10 mg/L, 5.5 mg/L であり、(1) 式よりメタノール注入率は 20 mg/L と設定した。

試算の結果、2 月のメタノール使用量は FF 制御で 22.1 t, 定量注入で 28.3 t であり、FF 制御によるメタノール削減効果は 22% であった。

5. ま と め

本報では、省スペースな窒素除去装置である高速移床式脱窒ろ過器 (LV450~700 m/日) の実証試験を行い、処理特性および有機物注入制御の効果について調査した。

LV450 m/日にて 5 ヶ月間運転を行った結果、冬の低水温期を含め安定した窒素除去が可能であった。

流入下水量の時間変動を考慮して LV450 m/日から LV700 m/日にろ過速度を増加させて運転を行った結果、LV700 m/日でも窒素除去は可能であり、ろ過速度への処理追従性も良好であった。

また、フィードフォワード制御による有機物注入を行うことで、原水性状の変動に対しても安定したろ過水 NO₃-N 濃度が得られ、目標 NO₃-N 設定に依じてろ過水 T-N 濃度も概ねコントロールできた。

さらに、フィードフォワード制御により、有機物注入量の削減効果が期待できた。

近年、下水処理場では早期の水質改善を目的に、従来の全体的な改築・更新による高度処理化の前に、運転条件の見直しや部分的な施設の改造など導入が容易なものから着手し、窒素・りん除去率を段階的に向上させていく取り組みが行われている。

脱窒ろ過法は、既設の砂ろ過設備に対して有機物注入設備の追加など比較的軽微な改造で、窒素除去機能を付加することが可能であり、窒素除去の早期対応にも有効な技術である。

参 考 文 献

- 1) 石井実ら：上向流移床型砂ろ過器による生物学的窒素除去、下水道協会誌, Vol. 43, No. 529, pp. 119-135 (2006)
- 2) 須藤真琴ら：上向流移床型ろ過 (実施設) における窒素除去技術, 第 44 回下水道研究発表会講演集, pp. 718-720 (2007)
- 3) 別府智志ら：上向流移床型ろ過 (実施設) における窒素除去技術 (その 2), 第 45 回下水道研究発表会講演集, pp. 764-766 (2008)
- 4) McCarty: Biological denitrification of wastewaters by addition of organic materials, Proc. 24th Ind.waste Conf., Purdue Univ., pp. 1271-1285 (1969)