

原 著

養豚污水处理施設におけるエリア型ファイバセンサ搭載

MLSS モニタを用いた曝気槽活性汚泥浮遊物質濃度の自動制御

田中 康男

一般財団法人畜産環境整備機構畜産環境技術研究所, 福島県西白河郡. 961-8061

要 約 養豚污水の活性汚泥法浄化施設の曝気槽活性汚泥濃度を自動制御で一定に維持することを目的として、内径 8 mm のノズルから曝気槽混合液を流下させその左右対称位置に配置したエリア型ファイバセンサで流下水の MLSS 濃度をモニタする計器とプログラマブルコントローラとを主要部とする余剰汚泥引抜き自動制御装置を製作し、その効果を実施設で検証した。自動制御開始以前の 2 年間は農家が引抜きポンプのタイマ設定で 5000 mg/L を目標とする管理を行っていたが、約 3000～10500 mg/L の範囲での変動を繰り返す状況が続いていた。しかし、自動制御開始後は MLSS 濃度を約 4 ヶ月間にわたり 5000～6000 mg/L の設定範囲内に維持できた。制御を実施した 2020 年の処理水中 BOD 濃度は、前年同期および前々年同期の BOD 濃度より有意に低かった。

キーワード: 養豚污水、活性汚泥法、曝気槽、MLSS 制御、MLSS モニタ

受領日: 08.01.2021. 受理日: 12.04.2021.

日本畜産環境学会会誌 No20 (1) pp30-37. 2021

No.19/20合併号としての発刊に伴い、掲載ページが改訂されました。No19/20 (1) pp42-49. 2021

緒 言

養豚污水の浄化処理には活性汚泥法が利用される。活性汚泥法では、曝気槽の活性汚泥浮遊物質 (MLSS) 濃度を適正値に維持することが浄化性能安定化のために最も基本的かつ重要な管理事項である。MLSS 濃度の維持のためには、定期的に MLSS 濃度または汚泥沈殿率 (SV) を測定し、その測定値に基づき汚泥引抜き量を調整する必要がある。引抜き量の調整は、水中ポンプの場合は一般にタイマ調整により行う。タイマ調整は管理者の経験に基づき行われるが、適正濃度を常時維持することは困難であり、変動幅が大きい場合が多

い。

MLSS 濃度の自動測定に基づいた引抜きの自動制御は MLSS 濃度の安定化に有効であるが、従来の浸漬型の MLSS 濃度測定装置は高額な上に定期的なメンテナンスが不可欠であり、養豚污水处理施設への導入は容易ではない。

この状況の改善を目指して、著者らは構造がシンプルでメンテナンスが容易な簡易型 MLSS モニタリングデバイス (MLSS モニタ) を開発した [3]。この MLSS モニタを中核とする汚泥引抜き自動制御システムを農家の污水处理施設に実装して約 4 カ月間実働させ、効果を確認したのでここに報告する。

材料および方法

1. 試験農場

試験を実施したS農場は、東北地方南部の中山間地に立地し、母豚210頭の一貫経営である。肥育豚舎はすのこ床式で、豚房下部にスクレーパー式除ふん機が設置されている。汚水処理施設は連続曝気式の膜分離活性汚泥方式である。曝気槽の有効容積は約200 m³である。BOD容積負荷は0.13~0.75 kg/m³・日の範囲で時期により大きく変動する。流入汚水は余剰汚泥と混合後にカチオン系高分子凝集剤を添加し、摺動スクリーン方式脱水機による凝集分離が行われ、分離液が分離液貯槽を介して曝気槽に流入する。

2. 試料採取および水質測定法

曝気槽混合液および処理水の採取は、装置稼働前の約2年間(2018年4月~2020年8月)と稼働後の約4カ月間(2020年9月~2021年1月)に毎週実施した。活性汚泥浮遊物質(MLSS)濃度の測定は、下水試験方法[2]によりガラス繊維ろ紙法で測定した。ろ紙にはワットマンGF/Bを使用した。処理水中の亜硝酸性窒素(NO₂-N)、硝酸性窒素(NO₃-N)およびアンモニア性窒素(NH₄-N)は、イオンクロマトグラフィー(島津製作所製SCL-10AVP, IC-A3カラム(陰イオン用), IC-SC1カラム(陽イオン用))により測定した。硝酸性窒素等の濃度(mg/L)は、「(NH₄-N濃度×0.4)+(NO₂-N濃度)+(NO₃-N濃度)」の計算式で算出した。処理水中の生物化学的酸素要求量(BOD)は、自動測定装置(VELP SCIENTIFICA製,B.O.D. Sensor)により20°C・5日間法で測定した。

3. 統計処理および決定木分析法

データの統計解析および決定木分析には、

データ解析用アプリケーションのR(version 4.0.0 (2020-04-24)) (R CORE TEAM, 2020)を使用した。決定木分析は、rpartパッケージによりclassification and regression tree (CART)法で行った。

4. MLSS モニタおよび汚泥引抜制御システム

図1にMLSS モニタの構造を示した。内径8 mmのノズルから被検液を流下させ、光軸径2.2×11mmのエリア型ファイバセンサ(パナソニックデバイス SUNX 製FT-A11)の投光ヘッドと受光ヘッドを流下水の左右対称位置に配置し、流下水による照射光の減衰率を測定することでMLSS濃度をモニタする。なお、

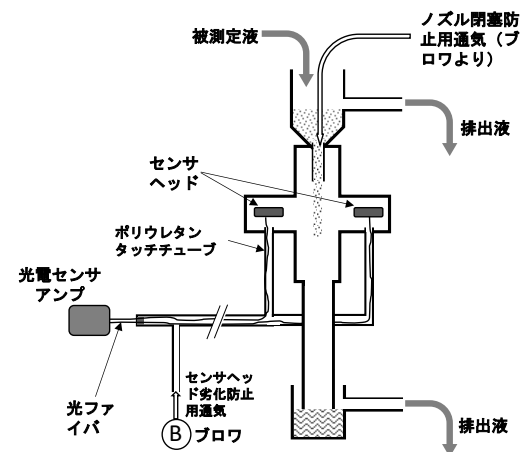


図1. MLSS モニタの構造および設置状況

照射光の幅は11 mm で、流下水の直径8 mm を上回るため、センサヘッドの照射部中央と流下水の落下中心軸の相対的位置関係は3 mm の許容ずれ幅を有する。このため、センサヘッドはモニタ製作時に設計位置にビス固定するだけでよく、センサ位置の微動機構は不要である。

図1に示したように、センサヘッドとアンプを接続する光ファイバー(10 m)は保護のためポリウレタン製タッチチューブの中を通した。また、センサヘッドの劣化を防ぐため、タッチチューブのアンプ側末端にはブロワ(テクノ高槻製小型エアポンプ25 GA、消費電力27W、風量25 L/min)を接続し、チューブを通じてセンサヘッドボックス内に清浄空気を送気した。曝気槽近傍では液面から発生する飛沫、湿気、アンモニアガス等によりセンサヘッドが劣化しやすいことから、清浄空気の送気はセンサヘッドの保護のために不可欠である。

曝気槽に投入した測定液採取用水中ポンプで、曝気液をMLSSモニタの受器に送液し、ノズルから自然流下させた(図2)。ノズルの流下可能量を上回る液は、受器側面の排出ノズルより排出した。ノズルを流下した液は、下部に設置したトラップを経て排出される。流下ノズルの異物閉塞を防ぐため、測定液採

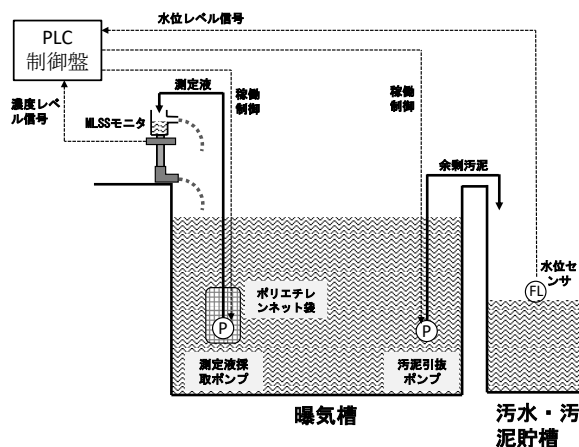


図2. 汚泥濃度自動制御システムのフロー (PLC: プログラマブルコントローラ)



図3. 水中への投入前にネット袋に挿入した測定液採取用水中ポンプ

取用水中ポンプは、ファスナー付厚手タイプメッシュコンバイン袋(穀殻袋)(58×74cm、ポリエチレン製、メッシュサイズ2 mm)内に挿入し(図3)、ホースと電源ケーブルの通過部分以外をファスナーで密封して曝気槽に投入した。測定液採取用水中ポンプとは別途に、汚泥引抜用水中ポンプを設置した。

制御盤は曝気槽に隣接するプレハブ建屋内に設置した。操作盤内にはセンサアンプ(パナソニックデバイスSUNX製FX-505-C2)とプログラマブルコントローラ(PLC)(キーエンス製KV-N1)を設置し、アンプからのNPN出力信号をPLCに入力させ汚泥引抜ポンプのシーケンス制御を行った。

制御のフローチャートは図4に示した。起動スイッチを押すと、まずタイマが起動し、1時間毎ないし2時間毎にシステムの稼働開始信号が発出される。この信号を受けて、貯槽水位のレベル検知が行われ、設定水位より高い場合はシーケンスが途中終了となりタイマの信号発出待ちに戻る。水位低の場合は測定液採取用ポンプが1分間稼働し、その間MLSSモニタで汚泥濃度が測定される。汚泥濃度が設定値以下の場合、シーケンスが途中終了となり、タイマの信号発出待ちの状態に戻る。濃度が設定値以上の場合、汚泥引抜ポンプが2分間稼働してシーケンスが終了とな

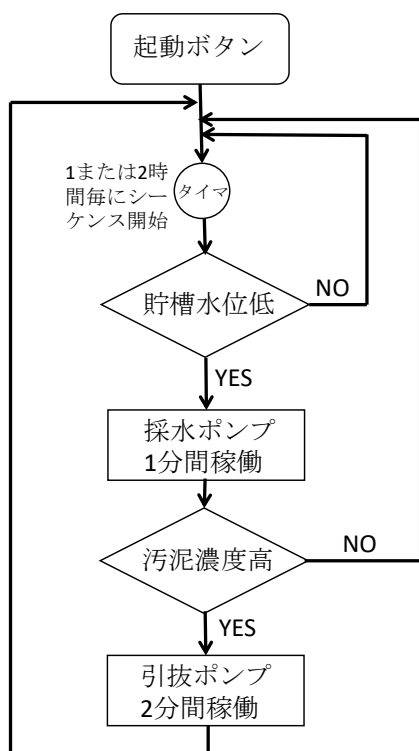


図4. 汚泥濃度自動制御システムのフローチャート

りタイマの信号待ちになる。以上のシーケンスにより、貯槽水位が異常上昇し溢れる事態や、MLSS モニタのトラブルにより引抜が連続的に進んでしまう事態は抑止できる。また、ノズルが閉塞した場合、MLSS モニタは濃度低と認識するので引抜ポンプは作動しない。

結果

1. MLSS 濃度の制御目標値の検討

MLSS 濃度の制御試験を実施するにあたり、試験施設の適正 MLSS 濃度を把握するため、約3年間にわたる週1回の水質データを用いて、決定木による分析を行った。まず、MLSS と水温を説明変数、硝酸性窒素等を目的変数とする重回帰の回帰診断図を作成し、3個の外れ値を特定して除外した。この前処理を行ったデータにより作成した決定木を図5に示した。この決定木では、水温は決定要因にならず、MLSS 4500 mg/L 以下では硝酸性窒素

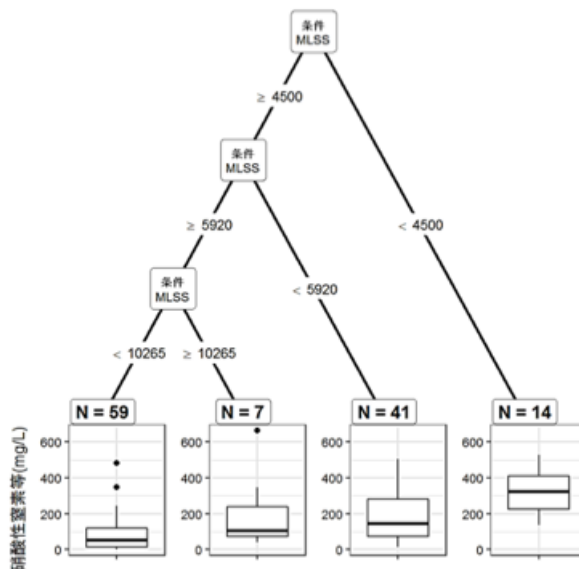


図5. 曝気槽 MLSS 濃度と処理水硝酸性窒素等濃度の関係に関する決定木分析の結果 (N: サンプル数)

等が高まり、5920 mg/L~10265 mg/L の範囲では低下する傾向が見られた。BOD を目的変数とする場合も同様な手順で決定木を作成した (図6)。この結果、水温が 25.5 °C を超える場合は MLSS 値によらず BOD は低い値を示し、25.5°C 以下の場合は MLSS が 5288 mg/L 以上で BOD 値が低下する傾向が見られた。

以上の決定木分析の結果を参考にすると、MLSS はおよそ 5300~10000 mg/L が適正と考えられた。一方、試験実施浄化施設は膜分離活性汚泥法を導入しており、膜分離の性能維持の観点からは MLSS は低く維持すべきことが経験的に把握されている。よって、今回の制御設定濃度は 5000~6000 mg/L とした。なお、設定濃度はエリアセンサ用アンプの設定閾値を変えることで調整できる。

2. 測定対象液採取法の検討

測定対象液採取用水中ポンプはポリエチレンネット袋に挿入した状態で使用したが、ネットの閉塞は約4ヶ月の試験期間中には生じ

活性汚泥濃度の自動制御実証

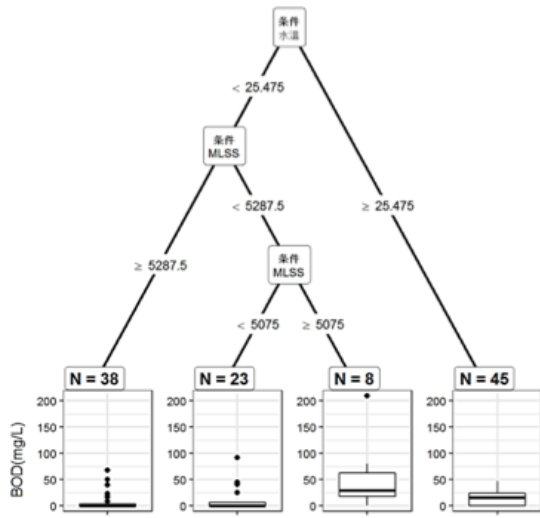


図6. 曝気槽の水温およびMLSS 濃度と処理水 BOD 濃度との関係に関する決定木分析の結果 (N: サンプル数)

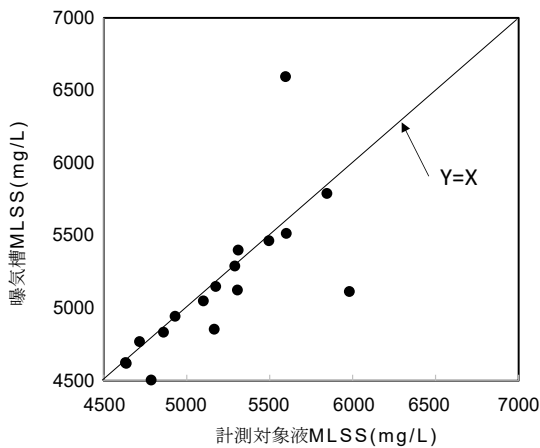


図7. MLSS 計測値に対するメッシュネットの影響

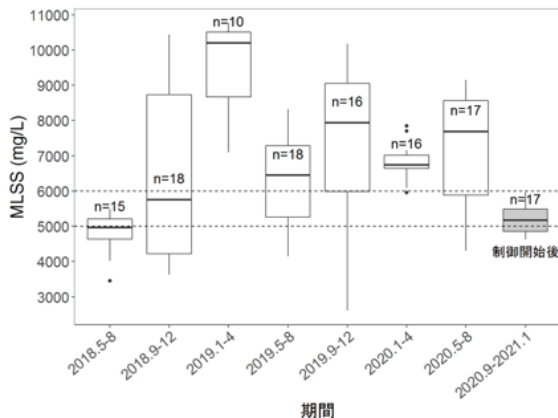


図8. 汚泥濃度制御開始以前と以後の汚泥濃度変化 (n は測定回数を示す)

なかった。水中ポンプの稼働は毎時1分と短時間であったこと、曝気気泡が常時ネット袋下部に当たり洗浄効果が発揮されたことにより閉塞が防がれたものと推測される。なお、ネット外の曝気液中 MLSS 濃度と水中ポンプで送液された被検液の MLSS 濃度とを比較したところ、2回を除き15回は両者がほぼ一致した(図7)。したがって、ネット袋により MLSS 濃度が低下する懸念は小さいといえる。なお、曝気槽液の方が被測定液よりかなり濃度が高かった1回については、汚泥を高濃度に含む泡層がサンプルに混入したためと推定される。

3. MLSS 制御結果

図8に自動制御稼働以前の2年間における4カ月間ごとの MLSS 濃度の変動状況と、稼働後約4カ月間の濃度変動状況を示した。自動制御開始以前は引抜ポンプ用タイマのマニュアル調整により 5000~6000 mg/L の MLSS の維持が目標とされていたが、大部分の期間でこの目標範囲を大きく逸脱し、濃度維持の困難さがあらためて示された。一方、制御開始後はマニュアル調整無しでほぼ 5000~6000 mg/L の濃度が維持され、制御の有効性が実証された。

4. MLSS 制御の効果検証

MLSS 制御を開始したことで処理水質になんらかの変化が起きたかどうかを検討するため、制御を実施した2020年9~12月期の水質と、前年同期および前々年同期の水質との比較を行った。

まず、2018~2020年の3箇年の9~12月期における硝酸性窒素等の変動範囲を図9に示した。2018年には平均値が約300 mg/L と高い値を示した。2019年には平均値は約140 mg/L 以下に低下したものの、1.5×IQR 値は400 mg/L を上回った。MLSS 濃度の自動制御

活性汚泥濃度の自動制御実証

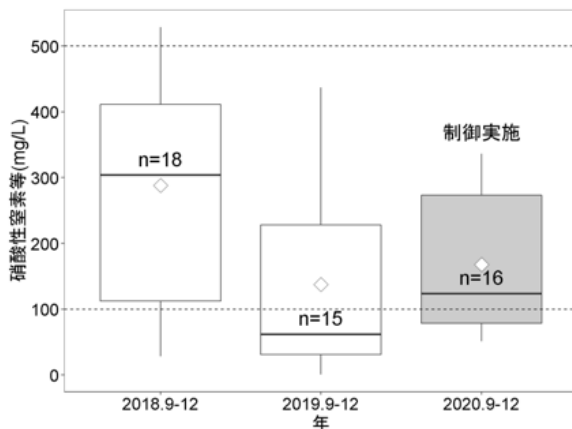


図9. 3箇年の9～12月期における処理水中硝酸性窒素等濃度の変動範囲

(ボックス内横線：中央値、ボックス内◇：平均値、n：サンプル数、図内上部破線：現行暫定基準値、図内下部破線：一般基準値)

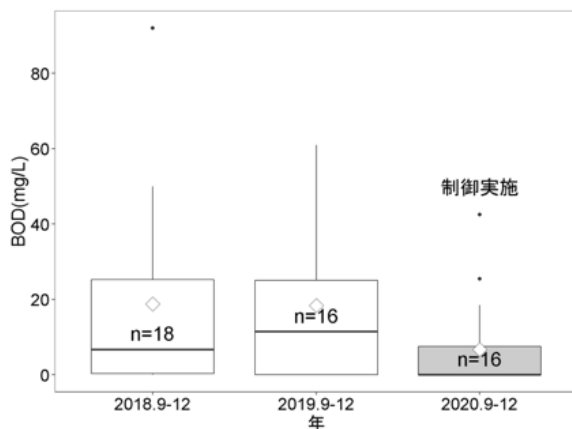


図10. 3箇年の9～12月期における処理水中BOD濃度の変動範囲

(ボックス内横線：中央値、ボックス内◇：平均値、n：サンプル数)

を実施した2020年には、平均値は2019年と同程度であったが、 $1.5 \times \text{IQR}$ 値は300 mg/L以下に低下し、制御の効果とも考えられた。しかし、Brunner-Munzel 検定[1]により各期の差の有意性を検討したところ、p値は2018年と2020年の間で0.128、2018年と2020年の間で0.167と高く、いずれも有意性は認められなかった。

次に、2018～2020年の3箇年の9～12月期

におけるBOD濃度の変動範囲を図10に示した。2018年、2019年ともに平均値は約20 mg/Lであったが、MLSS濃度の自動制御を実施した2020年には、平均値は10 mg/L以下に低下した。Brunner-Munzel 検定により各期の差の有意性を検討したところ、p値は2018年と2020年の間で0.022、2018年と2020年の間で0.035となり、いずれも危険率5%で有意であった。従って、BODについてはMLSS濃度の安定化が濃度低下に寄与した可能性がある。

考 察

自動制御実施中には気温が35℃を超える日もあり、しかもMLSSモニタは直射光を受ける位置に設置したことから内部の最高温度は40℃を大幅に超えたことが推測される。このような高温条件下でもセンサヘッドは正常に機能した。センサヘッドの耐熱仕様は上限70℃とされており、現場の高温環境下でも使用できることが実証された。

MLSSモニタのノズル閉塞が不定期に発生したため、直径3 mmのタッチチューブを先端がノズル中間に位置するようにノズル上部から挿入し通気を行うように改良してからは2か月間の閉塞発生は1回だけになった。実用化に当たっては、予防的措置として週に1回程度上部からブラシを差し込んでノズル内を清掃すれば良いと考えられる。なお、市販のMLSS計では測定セル部の水ジェット洗浄またはワイパー洗浄が不可欠とされているが[5]、今回開発したMLSSモニタは光学部が液体と直接接触しないのでこのような高度な洗浄は不要である。

本システムを導入する際に、MLSSモニタにより汚泥引抜ポンプを作動させる制御閾値を設定するには、あらかじめ設定した閾値で一定期間の運転後に実際のSVまたはMLSSを計測し、その濃度に応じて閾値を微調整する一連の作業を数回繰り返すことが必要であ

るが、以後は適正汚泥濃度が維持されるようになる。

なお、今回利用したセンサ用アンプは通信用オプション機器を付加するとプログラマブルコントローラ (PLC) を介して測定値のロギングおよび閾値の遠隔からの変更が可能となる。この機能を利用すれば、MLSS 濃度の変化状況の把握や、MLSS 濃度の遠隔調整が行えるようになる。

MLSS の適正濃度は各污水处理施設で異なり、また季節や豚の飼養頭数などによっても変わる。このような中で最適な MLSS 濃度を把握し、調整するのは農家には困難である。MLSS 濃度に加えて、污水处理施設の稼働状況を各種水質センサでモニタし、それらのデータを AI 技術の一種である機械学習手法で解析し MLSS の適正值を見いだしていくことが今後の管理では重要になると考えられる[4]。

謝 辞

本研究は日本中央競馬会畜産振興事業の研究助成(畜産汚水の発生・浄化における軽労型窒素低減システム開発普及事業)によるものであることを記し謝意を表します。調査にご協力いただいた農家の方々、MLSS モニタの改善にご協力いただいた中野企画 中野貞

雄氏に深く感謝いたします。また、水質測定を担当した畜産環境技術研究所の矢田部枝恵子さんに感謝いたします。

文 献

- [1] Brunner, E. and Munzel, U. (2000) The nonparametric Behrens-Fisher problem: asymptotic theory and a small-sample approximation: *Biometrical Journal*: 42(1):17-25.
- [2] 日本下水道協会(2012) 下水試験方法—2012年版—: 公益社団法人日本下水道協会(東京)。
- [3] 田中康男、中野貞雄(2020) 養豚廃水浄化施設用の活性汚泥濃度簡易モニタリング装置: 日本畜産環境学会会誌: http://www.apesdlj.jp/Tanaka2.org/020062.0_Inpress.pdf
- [4] 田中康男(2021) 機械学習による養豚污水处理施設の性能向上に向けて—決定木解析による個別施設の硝酸性窒素等除去特性把握の試み—。日本養豚学会誌: 印刷中。
- [5] 武石雅志、尾形好和、鶴之園龍一、清野真二郎(1998) 活性汚泥濃度(MLSS)計の機能向上: 横河技報: 42(4):135-138.

Original Paper

Automatic control of mixed liquor suspended solids concentration in aeration tank of swine wastewater treatment plant using MLSS monitoring device equipped with area type fiber sensor

Yasuo Tanaka

Institute of Livestock Industry's Environmental Technology, Nishi-Shirakawa 961-8061,
Japan

Automatic control system for regulating mixed liquor suspended solids (MLSS) concentration in swine wastewater treating activated sludge plant was operated over 4 months. The system consisted of innovative MLSS monitoring device equipped with area type fiber sensor and programable controller. In the MLSS monitoring device, mixed liquor of activated sludge was flowed down from 8 mm in diameter nozzle and its turbidity was measured with 2 heads of area type fiber sensor which were symmetrically arranged in both sides of the liquid fall. The MLSS regulation had been carried out by timer control of sludge withdrawal pump prior to the system installation. During this period, concentration of MLSS fluctuated drastically in a range of 3000 -10500 mg/L. On the other hand, concentration became stabilized within 5000-6000 mg/L for about 4 months after system installation. Biochemical oxygen demand of wastewater treatment plant effluent during the test period was significantly lower than those of preceding two years.

Key words: swine wastewater, activated sludge process, aeration tank, MLSS control, MLSS monitor

Corresponding: Yasuo TANAKA ytanaka@chikusan-kankyo.jp

Receipt of Ms: 08.01.2021. Accepted: 12.04.2021.

Journal of Animal Production Environment Science No.20(1) pp30-37. 2021

The page has been revised due to the publication as a No19/20 merger issue. No19/20 (1) pp42-49.

2021