

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

田中康男¹、中野貞雄²

¹一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

²中野企画、埼玉県朝霞市 351-0012

要約 活性汚泥法の養豚廃水浄化施設では曝気槽の活性汚泥濃度 (MLSS) の調整が重要である。しかし、適切に調整できている農場は少ない。この状況の改善のため、MLSS 濃度をモニタし汚泥引抜ポンプを自動制御するシステムの構築を目指し、簡易 MLSS モニタを開発した。モニタは、曝気液を内径 8 mm のノズルから自由落下させ、落水水柱の左右に透過型光電センサの照射および受光ヘッドを配置し、水柱による透過光の減衰を把握する。センサは試料液に接触せず、洗浄は不要である。また、幅 11mm の帯状光を照射するエリア型センサを使用したため、光軸調整は不要であった。さらに、アンモニア等の腐蝕性気体がセンサに拡散することを防ぐ機構も有する。モニタ表示値と MLSS 濃度の間には、指数関数で近似される関係があり、MLSS 濃度を 5000 mg/L に維持するためには、表示値が 2900 以下になった際に汚泥引抜を行えば良いことが示唆された。

キーワード: 養豚廃水、活性汚泥法、MLSS 濃度、モニタリング装置

受領日: 03.06.2020. 受理日: 11.06.2020.

日本畜産環境学会会誌 No20 (1) pp1-9. 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) pp62-70. 2021

緒言

養豚廃水浄化施設の大部分では活性汚泥法が採用されている。活性汚泥法では、微生物増殖に伴い活性汚泥 (MLSS) 濃度が常に増加する。このため、浄化施設の管理では、MLSS 濃度を把握し、濃度が一定以上に上昇した時に引抜用ポンプを作動させ汚泥濃度を適正值まで下げる作業が不可欠である。しかし、引抜きが適切に行われずに汚泥濃度が過大になり、処理水質が悪化するケースが多い。

この現状を改善するには、MLSS 濃度を自動測定し、測定値に基づいて汚泥引抜を自動制御するシステムの実用化が望まれる。一般社団法人全日本畜産経営者協会のアンケート調査[1]によると、養豚経営者が今後ふん

尿処理分野で導入したいスマート技術 (ロボット・AI・IoT等利用技術) として、汚水浄化システムが第一位に位置づけられている。MLSS 濃度自動制御システムはこの要望に添うものと考えられる。

仁木ら[5]は、人用小型浄化槽の処理水濁度測定を目的として、ワイパー洗浄方式の小型透過光式濁度センサを開発している。このセンサは簡易さが長所であるが、処理水への適用を目的とする浸漬型であるため、懸濁物を高濃度に含む曝気槽への適用には不向きと予想される。

日本下水道協会[4]は、オンサイトで利用可能な MLSS 計として、透過光率式、ダブル散乱光比較式、反射散乱光式、透過光散乱光比較方式をあげている。これらの MLSS 計

簡易型 MLSS モニタ

に共通する留意事項として、セル窓の定期的な洗浄又は自動洗浄が必要であり、ブラシ、水ジェット、ワイパー等の手法があるとしている。これらの自動洗浄を組み込んだ場合、構造的に複雑化は避けられない。田中[7]は、下水道で使用されている自動測定機器は、経費、維持管理性など克服すべき課題が多いと指摘している。下水処理場に比較して格段に小規模な畜産廃水処理施設では、価格面およびメンテナンス面で、これらの既存の MLSS 計は導入困難と推測される。

杉山ら[6]は、畜産向けの簡易装置として、曝気槽活性汚泥濃度の簡易指標である活性汚泥容量率 (SV) を光電センサ搭載装置で自動測定し、この測定信号に基づき汚泥引抜用エアリフトポンプ駆動用送気ラインの電磁弁を PC 制御し活性汚泥濃度を一定範囲に保つシステムを開発した。この技術は、活性汚泥性状によっては、有効性が高いと思われる。しかし、膜分離活性汚泥法では、活性汚泥濃度が高く、静置しても汚泥沈降界面が形成されないため適用できない。また、通常の活性汚泥法でも、バルキングやフロック解体により活性汚泥の沈降性が悪化した場合や、脱室気泡の発生により沈降中の汚泥層が浮上してしまう場合などにも適用困難である。

田中ら[8]および田中ら[9]は、畜舎廃水の水質把握を目的とする簡易かつ非接触式の測定装置を開発した。この装置では、測定対象液を内径 8mm のノズルから流下させ、形成された流下水柱の左右に配置した透過型光学センサにより非接触で透過光の減衰をモニタリングする (図 1)。センサが汚水と接触しないため、洗浄機構が不要という長所を有する。しかし、廃水から揮散する腐食性ガスや蒸気が光学部分に拡散することまでは抑止できず、センサ劣化の懸念がある。この問題の克服のため、図 2 の装置構造を考案した [10]。流下ノズルを円筒内に配置し、流下水

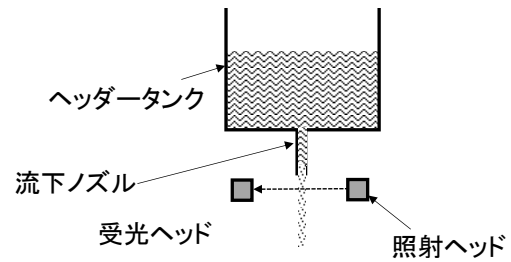


図 1. 簡易測定装置の基本構造

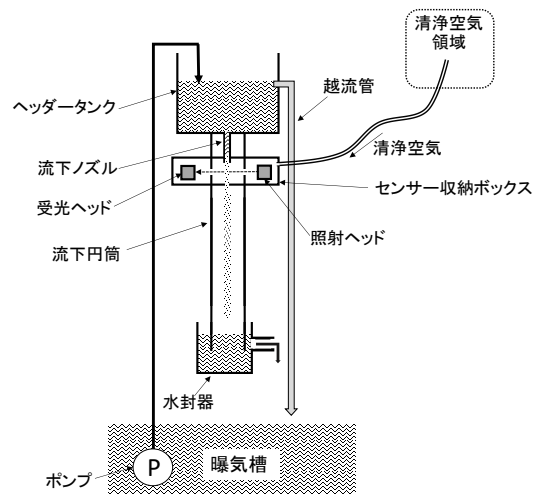


図 2. MLSS モニタ構造図

を円筒内で自由落下させ、下端に設置した水封器の水封液に落下させる。水面に液滴が落下する際に空気が水中に巻き込まれる現象 [2] により、流下水の着水時に円筒内の空気が水封液に巻き込まれ、水流とともに円筒外部に排出される (図 3)。この結果、円筒の内部から外部への空気移送が生じ、円筒内は陰



図 3. 落下水流による空気移送の状況

簡易型 MLSS モニタ

表1. 調査農場の概要

農場名 (略称)	立地場所	飼養規模・経営形態	汚水排出状況	汚水浄化施
S農場	福島県 浜通り南部中 山間地	肥育豚換算2000頭、 一貫経営	肥育豚舎はスクレーパー式ふん尿 分離。汚水と余剰汚泥を混合後に 凝集脱水機で固液分離し、分離液 を浄化施設の曝気槽に投入。排水 量25~35m ³ /日。	連続式活性汚泥法曝気槽に 外付け膜分離施設を後付し た膜分離活性汚泥法
T農場	栃木県 平地農業地域	肥育豚換算800頭、 一貫経営	肥育豚舎はスクレーパー式ふん尿 分離。汚水と余剰汚泥を混合後に 凝集脱水機で固液分離し、分離液 を浄化施設の曝気槽に投入。排水 量4~5m ³ /日。	循環式硝化脱窒法式曝気槽 に外付け膜分離施設を後付 した膜分離活性汚泥法

圧となる。

円筒上部の左右には円筒と連通した気密性ボックスが取り付けられ、ボックス内に光電センサの投光ヘッドおよび受光ヘッドが設置されている。円筒内が陰圧になると、このボックス内も陰圧となり、ボックスに接続されたチューブから外気が吸引される[10]。チューブ末端を清浄空気領域に延長しておけばボックスには常に清浄空気が導入されセンサヘッドの劣化防止が期待できる。

本報では、開発した装置（以下「MLSS モニタ」と呼ぶ）の性能検証と、装置を活用した MLSS 濃度自動制御システムの構築事例について述べる。

材料および方法

1. 曝気液試料

福島県中通り南部の中山間農業地域に立地する S 農場、および栃木県中央部の平地農業地域に立地する T 農場の浄化施設で、2018 年 4 月から 2020 年 4 月にかけて、原則として毎週 1 回曝気液を採取した。各農場の規模、経営形態、浄化施設仕様を表 1 に示した。採取試料により MLSS 濃度の測定と、MLSS モニタによる計測を行った。

2. MLSS 濃度の測定

下水試験方法[3]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。

3. MLSS モニタ

エリア型ファイバセンサ（パナソニックデバイス SUNX 株式会社製 FT-A11 センサヘッド(光軸径 2.2×11mm)）を搭載した装置を製作した(図 4)。センサヘッドの照射光幅は 11mm あり、この範囲内に流下水が通過すれば測定可能である。このため、厳密な光軸調整は不要である。また、センサヘッドは、光学デバイスであるため耐熱温度は 70℃と高い。センサヘッドとアンプの間を接続する光ファイバーは空気吸引用ソフトウレタン製タッチチューブの中を通した。タッチチューブは、光ファイバー保護と、清浄空気導入路としての、2つの機能を同時に果たす。光ファイバーは最長 10m まで延長可能である。



図 4. MLSS モニタの外観と内部

4. データの統計解析

統計解析用フリーソフトウェア R (version 4.0.0 (2020-04-24) "Arbor Day" Copyright (C) 2020 The R Foundation for Statistical Computing Platform: x86_64-

w64-mingw32/x64 (64-bit) を使用した。

結果および考察

1. MLSS 濃度の変動実態

S 農場は 2000~11000mg/L (図 5)、T 農場は 2500~8500mg/L (図 6) と、最大/最小の比が 3.4~5.5 倍と大きく変動した。

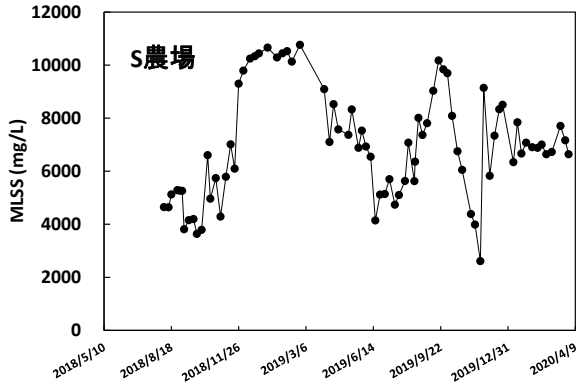


図 5. S 農場における MLSS 濃度実測値の変動

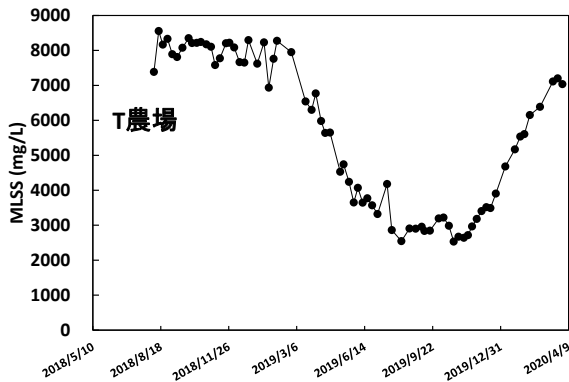


図 6. T 農場における MLSS 濃度実測値の変動

このように大きく変動した理由としてまず挙げられるのは、農家が MLSS 計を所有しておらず、勘に頼った管理になっていることである。なお、S 農場では、1L メスシリンダーに曝気液を投入し 30 分沈降させて汚泥界面高さを測定する SV 値で管理を試みた時期もある。しかし、30 分待たねばならないという面倒さと、沈降途中で汚泥が浮上り測定不能になるケースも多く、取り組みを断念してしまった。

このような現場状況の改善のためには、

MLSS 濃度の連続モニタリングに基づく引き抜きの自動制御が有効と考えられる。

2. MLSS モニタの空気吸引量の計測

MLSS モニタに通水した際の空気吸引量を図 7 の装置で測定した。ヘッダータンクには給水栓から水道水を供給した。センサー収納ボックスの側面コネクタに長さ 1m のタッチチューブを取付け、チューブ末端をガスマーター (株式会社シナガワ製乾式ガスマーター、MODEL DC-1A) に接続した。流下ノズルは内径 4.0、6.0、8.0mm の 3 種類について試験した。流下円筒は内径 20.5 mm、長さ 430 mm とし、円筒下端 12mm を水封液中に挿入した。

空気吸引量測定結果は表 2 に示した。いずれのノズル径でも空気吸引が可能であるが、吸引量はノズル径が大きくなり流下水量が多くなるほど高まった。一方、水封無しでは吸引は全く生じなかった。なお、流下円筒が傾斜して、流下水が円筒内壁表面に沿って流下すると空気吸引が停止した。このため、設置時に鉛直性を確保し、流下水を自由落下で水封液に着水させることが重要である。

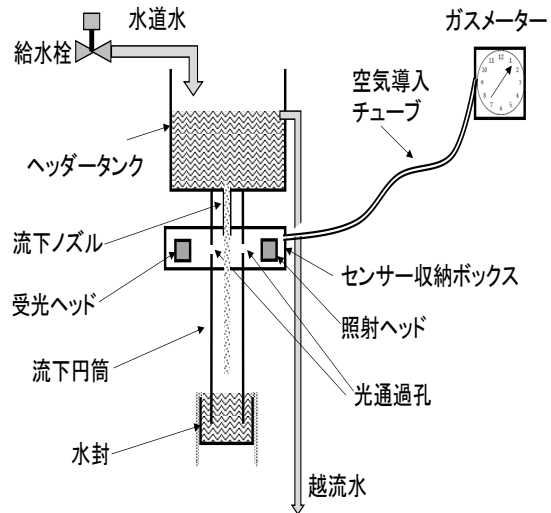


図 7. 空気吸引量測定に使用した装置

簡易型 MLSS モニタ

表2. MLSSモニタの空気吸引量測定結果

流下ノズル径 (mm φ)	水封の有無	流下水量(L/分)	吸引空気量(L/分)
4.0	有	2.16	0.41
	無	2.16	0
6.0	有	4.08	1.75
	無	4.08	0
8.0	有	7.4	2.44
	無	7.4	0

表3. S農場低濃度域での回帰分析結果

パラメータ	推定値	標準誤差	t 値	P 値
A	7.196E+05	5.397E+05	1.333	0.239968
B	-1.785E-03	2.378E-04	-7.507	0.000663 ***
残差の標準誤差			250.5	

(*** 0.1%水準で有意)

3. MLSS 濃度と MLSS モニタ表示値の関係

S農場およびT農場で採取した曝気液を水道水で段階的に希釈し、実験室内に設置したMLSSモニタで計測を行った。測定条件は、流下ノズル内径8mm、センサヘッド面間230mm、流下曝気液量2.7L/分、投光パワー低とした。なお、水道水を通水した際の表示値は7700~7800であった。

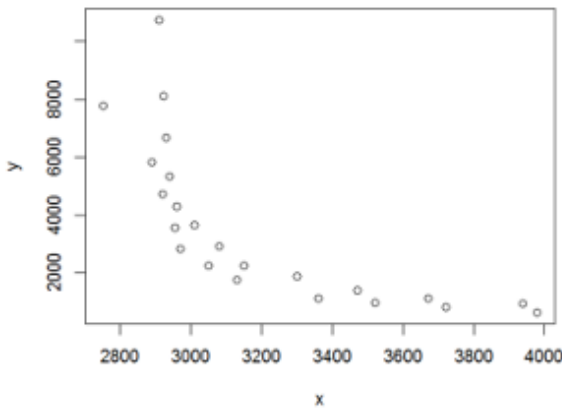


図8. S およびT農場におけるモニタ表示値(x)とMLSS濃度(y)の関係

測定の結果、MLSS濃度とMLSSモニタ表示値との間には曲線関係が見られた(図8)。

スピアマンの順位相関係数を求めたところ、両者の間には強い負の相関が認められた($r=-0.9612$, $p<0.001$)。ただし、一つの関数式で全体を近似することはできなかった。

そこで、各農場の濃度領域ごとに指数関数 ($Y=A*e^{Bx}$) による近似を行ったところ以下のようになった。

まず、S農場における約900~3600mg/Lの低MLSS濃度域では図9のように近似できた。パラメータ推定値、標準誤差、t値、P値、残差標準誤差は表3に示した。

S農場におけるMLSS約4000~10000mg/Lの高濃度域でも、

図10の近似ができた。パラメータ推定値、標準誤差、t値、P値、残差標準誤差は表4に示した。目標MLSS濃度を5000mg/Lとする

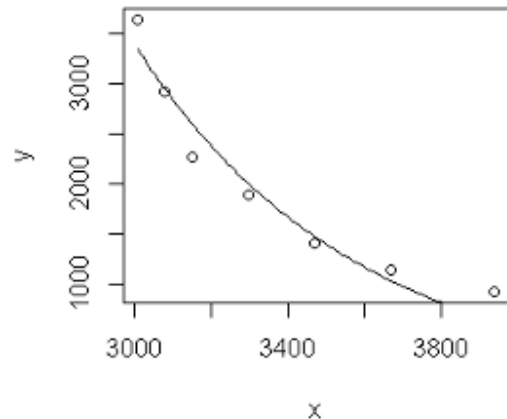


図9. S農場曝気液におけるモニタ表示値(x)とMLSS濃度(y)の関係(低濃度域)

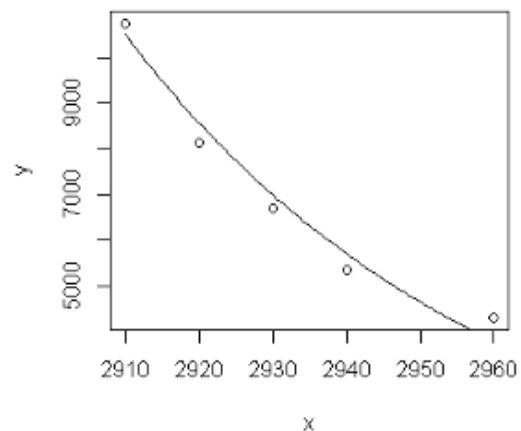


図10. S農場曝気液におけるモニタ表示値(x)とMLSS濃度(y)の関係(高濃度域)

簡易型 MLSS モニタ

表4. S農場高濃度域での回帰分析結果

パラメータ	推定値	標準誤差	t 値	P 値
A	6.167E+29	3.368E+30	0.159	0.88345
B	-2.039E-02	2.146E-03	-9.502	0.00247 **
残差の標準誤差	476.6			

(** 1%水準で有意)

表5. T農場低濃度域での回帰分析結果

パラメータ	推定値	標準誤差	t 値	P 値
A	2.635E+05	1.766E+05	1.492	0.21
B	-1.583E-03	2.082E-04	-7.606	0.0016 **
残差の標準誤差	153.8			

(** 1%水準で有意)

表6. T農場高濃度域での回帰分析結果

パラメータ	推定値	標準誤差	t 値	P 値
A	1.484E+08	3.141E+08	0.472	0.6688
B	-3.572E-03	7.442E-04	-4.800	0.0172 *
残差の標準誤差	790.2			

(* 5%水準で有意)

場合、表示値が 2945 以下になったときに汚泥引抜を行えばよいことになる。

T 農場の MLSS 約 500~2000mg/L の低濃度域においても、図 11 のように近似ができた。パラメータ推定値、標準誤差、t 値、P 値、残差標準誤差は表 5 に示した。

T 農場の MLSS 約 3000~8000mg/L の高濃度域では、図 12 の近似ができた。パラメータ推定値、標準誤差、t 値、P 値、残差標準誤差は表 6 に示した。目標 MLSS 濃度を 5000mg/L とする場合、表示値が約 2900 以下になったときに汚泥引抜を行えばよいことになる。この目安値は S 農場の場合とほぼ一致した

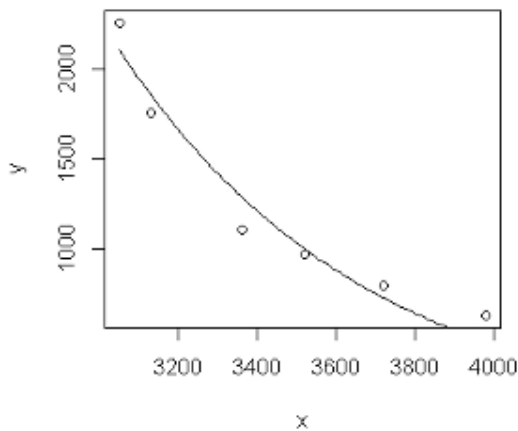


図 11. T 農場曝気液でのモニタ表示値(x)と MLSS 濃度(y)の関係 (低濃度域)

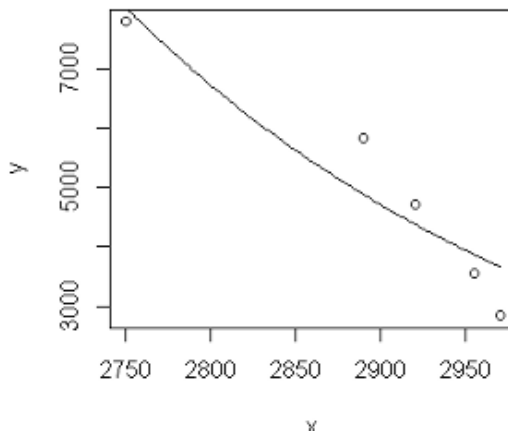


図 12. T 農場曝気液でのモニタ表示値(x)と MLSS 濃度(y)の関係 (高濃度域)

ことから、農場が異なっても同様なレスポンスの得られることが示唆された。

4. 余剰汚泥引抜ポンプ自動制御システムの構築事例

MLSS モニタ (ノズル径 8mm、センサヘッド面間 170mm) を S 農場内曝気槽上部に設置し、曝気槽に投入した水中ポンプで曝気液を MLSS モニタのヘッダータンクに送液し (図 13)、ヘッダータンク下部ノズルから 5.2L/分で流下させた。水封器は塩ビ製チーズで製作

した (図 14)。MLSS モニタの空気吸引チューブは内径 6mm、長さ 10m とした。チューブの末端にガスメーター (株式会社シナガワ製乾式ガスメーター、MODEL DC-1A) を接続して曝気液を流下させた際の空気吸引量を測定したところ 0.45L/分であった。

流下ノズルの異物閉塞を防ぐため、曝気液採取用水中ポンプは上端が水面上に露出するように曝気槽に浸漬した SUS 製パンチングメタル円筒内に設置した。また、曝気液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。制御用操作盤 (図 15)

簡易型 MLSS モニタ



図 13. S 農場の曝気槽に設置した MLSS モニタの外観



図 14. 塩ビ配管材で製作した水封器

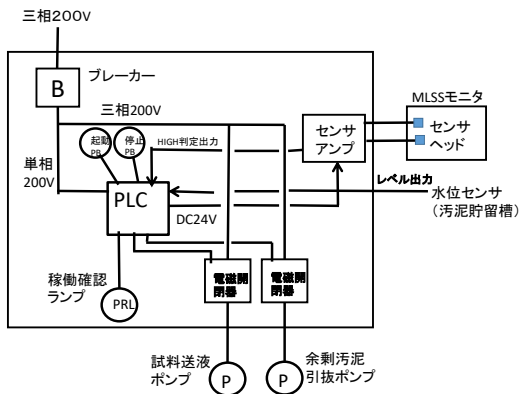


図 15. 余剰汚泥引抜自動制御用操作盤 (上) とその回路図 (下)

は近傍の建屋内に設置した。操作盤内にはセンサアンプ (パナソニックデバイス SUNX 株式会社製 FX-505-C2) とプログラマブルコントローラ (PLC) (株式会社キーエンス製 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ラダー制御を行った (図 16)。

ラダーには、インターロックとして、余剰汚泥貯槽の水位センサの信号を入力し、高水位ではポンプが起動しないようにした。また、ポンプ起動から設定時間 (1~5 分程度) が経過すると MLSS モニタの値に関係なくポンプを停止させ、その後休止設定時間 (数時間) が経過すると自動起動するサイクル運転とした。

水中ポンプのトラブルやノズルの閉塞等によりノズルからの流下が停止した場合には、MLSS モニタからの信号が OFF になるので汚泥引抜ポンプは停止状態になる。以上のようなシステムの特長により、万一誤測定が発生した場合でも連続的に汚泥を引き抜く最悪の事態を防ぐ設計にした。

システムの稼働開始当初に明らかになった問題は、水流の微小な揺らぎによりモニタ表示値が一定範囲で変動する点であった。この変動に適切に対応しないと、汚泥引抜ポンプの制御が安定しない。これに対応するため、センサアンプの設定調整により、応答速度を長くし、ヒステリシスを高め、オンデイレータイマーとオフデイレータイマを使用する調整で安定化できた。

測定データはまだ十分には得られていないが、2020 年 3 月 30 日~2020 年 6 月 8 日の間の 10 回の計測では MLSS 濃度 6000~9000 mg/L の範囲でモニタ表示値は 1500~2300 の値を示した (図 17)。今後、表示値と MLSS 濃度との関係を把握するとともに、システムの稼働による MLSS 濃度の安定化効果について長期的な評価を実施する予定である。

簡易型 MLSS モニタ

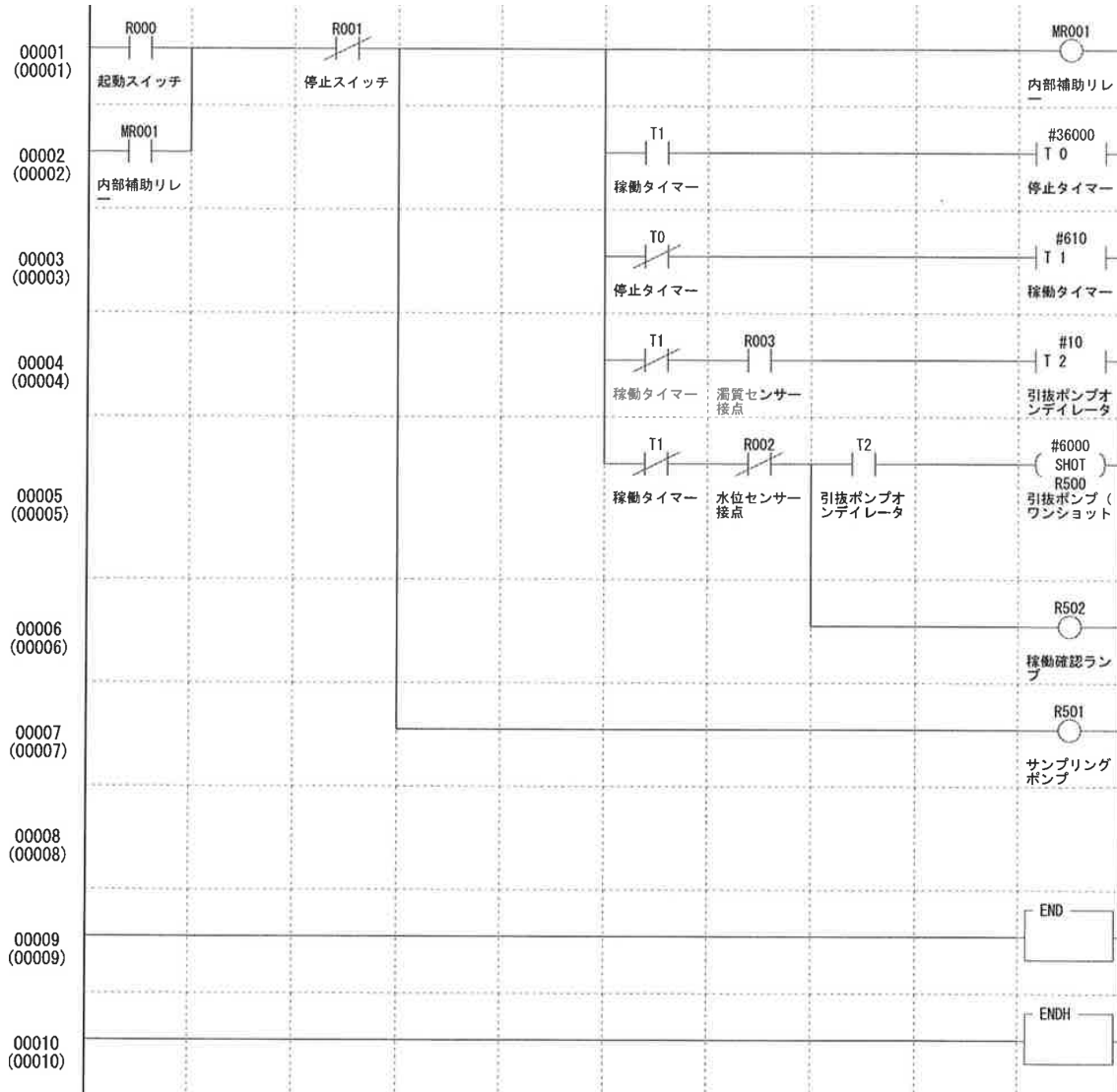


図 16. 余剰汚泥引抜自動制御用ラダー図

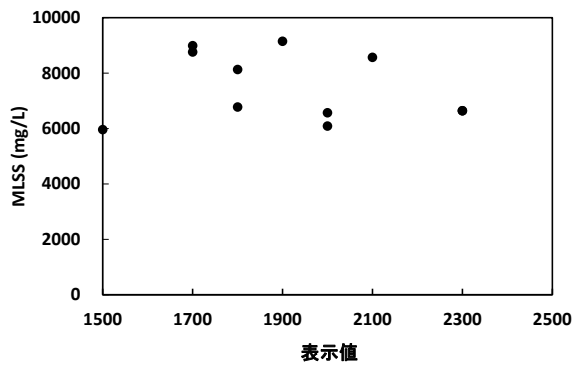


図 17. S 農場に設置した MLSS モニタの表示値と曝気液 MLSS 濃度実測値の関係

文 献

- [1] 一般社団法人全日本畜産経営者協会 (2019) スマート畜産調査普及事業平成30年度報告書.
- [2] 水谷正和(1977) 液滴の静止水面への落下. 中部工業大学紀要. A. 13:11~17.
- [3] 日本下水道協会(2012) 下水試験方法上巻-2012 年版-. 公益社団法人日本下水道協会.
- [4] 日本下水道協会(2019) 下水道施設計画・設計指針と解説 後編-2019 年版-, 公益社団法人日本下水道協会.

簡易型 MLSS モニタ

- [5] 仁木圭三、木曾祥秋、志子田淳、熊谷大輔、藤後達也(2009) 小型浄化槽水質の簡易型 BOD センサを用いた遠隔管理システムの構築. EICA. 13(4):52-58.
- [6] 杉山典、中村茂和、白岩佑美子、村松明弘、西村文武(2013) 畜産排水処理における汚泥容量の自動計測制御システムの開発 (第1報). 静岡畜技研中小研セ研報. 6:24~28.
- [7] 田中宏明 (1994) 下水道での水質計測機器. 計測と制御. 33(8):639-644.
- [8] 田中康男、森達摩、矢吹芳教、相子伸之、渡辺高秀、篠崎秀明、渡辺是文、横山浩、萩野暁史(2009) 畜舎排水水質の簡易自動モニタリング装置の性能検討. 日本畜産学会報. 80(1):83-90.
- [9] 田中康男、和木美代子、横山浩、森達摩、矢吹芳教(2011) 水質モニタリング装置. 特許第 4817100 号.
- [10] 田中康男(2019) 光学式水質モニタリング装置. 特願 2019-149278 号.