

技術講座

養豚污水浄化施設曝気槽における異常発泡と水質との関係

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 養豚污水浄化施設では活性汚泥法の曝気槽で発泡が異常に激しくなり、槽の上部から曝気液が周囲に越流し汚染するトラブルの生ずることがある。発泡を止めるには消泡剤の散布が有効であるが、管理者不在時や夜間に発泡が激化するような場合は防止が困難である。このため、どのような条件で発泡が強まるのかを検討するため AI 手法の一種である機械学習法で水質との関係について分析を行った。この結果、電気伝導率と水温が発泡に強く影響することが示唆された。

キーワード : 養豚污水、活性汚泥法、浄化施設、異常発泡、機械学習

受領日: 11.07.2022. 受理日: 22.07.2022.

日本畜産環境学会会誌 No.22(1) pp39-45. 2023

緒言

活性汚泥法の養豚污水浄化施設曝気槽で曝気液の発泡性が異常に高まり、曝気槽から泡層が越流する事態は多くの農家が経験している(図1)。越流の兆候を察知した場合には調製した消泡剤希釈液を水面に散布する対応で泡層を消すことができる。しかし、消泡剤の効果は持続性がないため、管理者不在時や夜間に発泡が強まり越流してしまう場合もある。越流量が多くなると農場内が汚泥で汚染されるばかりでなく、万一、農場敷地外に流出した場合には近隣トラブルの原因にもなる。

このような異常発泡は下水処理場でも生ずることが報告されている[3]。藤田[2]によると、下水処理場における発泡の原因は、細胞表面に疎水性のワックスを産生する微生物が増殖し、ワックスが気泡の表面に多数付着すると、気泡と気泡の会合が妨げられ、微細気泡として安定的に活性汚泥中に存在するようになることと推測している。

そして、原因微生物の増殖を防ぐことが発泡対策として重要と示唆している。葛西・前保[3]は、異常発泡は低水温期に増殖しやすい放線菌が原因と推測し、放線菌の増殖を抑制するには硝化を進めてpHを下げることで有効と推定した。



図1. 異常発泡による曝気液越流事例

(左: 曝気槽上端に達した泡層、右: 泡層の越流で流出した汚泥)

以上のような知見はあるものの、未だに確実な予防法は確立されておらず、特に養豚污水浄化施設では発生事例が多いため頭の痛い問題となっている。発泡原因が不明

汚水浄化施設の異常発泡

表 1. 調査農場の概要

農場名	立地場所	飼養規模・経営形態	汚水排出状況	汚水浄化施設
SF 農場	福島県南部中山間地	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 25~35 m 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
TY 農場	栃木県中央部中山間地	肥育豚換算 800 頭、一貫経営	肥育豚舎はスクレーパ式ふん尿分離。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 4~5 m 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

であっても、事前に予測できれば、消泡剤の予防的散布などの対応措置も可能になる。そこで、発泡性を「発泡度」として定量的にとらえる手法を開発し、2 箇所の農場で発泡度と曝気液および処理水の水質を経時的に測定した。このデータを利用して、AI 手法の一つである機械学習法で水質と発泡度との関係を分析したので、結果を報告する。

材料および方法

福島県南部中山間地に立地する SF 農場および栃木県中央部中山間地に立地する TY 農場の浄化施設で、2019 年 7 月から 2022 年 7 月にかけて、原則として毎週 1 回曝気液と処理水を採取した。また、サンプル採取時に曝気槽水温を測定した。各農場の規

模、経営形態、浄化施設仕様は表 1 に示した。

研究所に持ち帰った試料で、発泡度および各種水質項目を測定した。発泡度は 2 L メスシリンダーにサンプル 0.5 L を投入し 2.5 L/分で 5 分通気し、その間の最大泡層厚(cm)を測定し、その値を発泡度と定義した。なお、泡層がメスシリンダーの上端を上回る場合はプラスチック円筒をメスシリンダーの上部に取付けて測定した。散気には直径 50 mm の PTFE 製散気円盤(アズワン製 PTFE バブラー, 平均孔径 40 μm) を使用した。発泡度測定装置の形状は図 2 に示した。

pH はガラス電極法 (YOKOGAWA Personal PH/ORP Meter (MODEL-PH72)) で測定した。校正は JIS-Z8802:2011 に基づき、pH4.0 フ

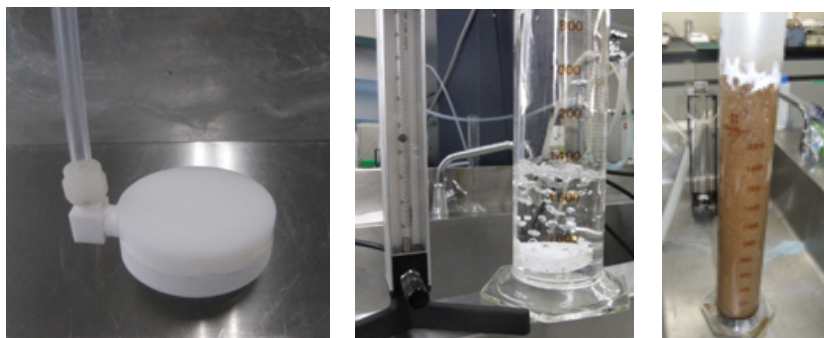


図 2. 発泡度測定装置

(左：散気用円盤、中央：空気流量計と通気状況、右：試料からの発泡状況)

汚水浄化施設の異常発泡

タル酸塩 pH 標準液と pH6.86 の中性リン酸塩標準液の 2 点で行った。電気伝導率 (EC) は JIS-K0130:2008 に基づき交流 2 極法 (堀場製作所製コンパクト電気伝導率計 LAQUAtwin-EC-33) で測定した。毎回の測定時には 1.41mS/cm および 12.88mS/cm の標準液で 2 点校正を行った。測定値が 20 mS/cm を超える場合には純水で 2 倍希釈した試料を調製して測定し、測定値を 2 倍して EC 値を求めた。活性汚泥浮遊物質 (MLSS) 濃度は、日本下水道協会 [5] 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。ろ紙ろ過量は、(社) 日本水環境学会・膜を利用した水処理技術研究委員会 [4] により、

ろ紙 5C (150mm φ) を装着したロートを 50mL メスシリンダーに立て、ろ紙内に 50mL の試料液を注ぎ入れた後 5 分間静置し、メスシリンダーに落下したろ液量を計測して求めた。粘度は回転粘度計 (RION 製 VISCOTESTER VT-03) を使用し mPa・s 単位で測定した。処理水中の亜硝酸性窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) 濃度は、日本下水道協会 [5] によりイオンクロマトグラフ法 (島津製作所製 SCL-10AVP, IC-SA2 カラム, 溶離液 12 mmol/L 炭酸水素ナトリウム+0.6 mmol/L 炭酸ナトリウム) で測定した。

発泡度および水質測定値を用いて、オープンソースデータ解析アプリケーション R [6] の rpart パッケージで決定木分析を行った。

決定木手法の利点として有賀・大橋 [1] は、「このようなケースではこういった結果になる、という例が明確に示せる」という点をあげている。

結果および考察

SF 農場と TY 農場での発泡度の経時変化を図 3 に示した。TY 農場では冬に高まる傾向がみられ、特に 2021 年と 2022 年の冬は最大 70 程度まで高まった。一方、SF 農場では発泡度はおよそ 20 以下の低レベルで変動した。

季節別の発泡度の分布をみると、図 4 に示したように SF 農場、TY 農場ともに冬期 (12~2 月) に最も高い値が出現し、春期 (3~5 月) に 2 番目に高い値が出現する共通の傾向がみられた。冬期に発泡が強まる傾向は、「低

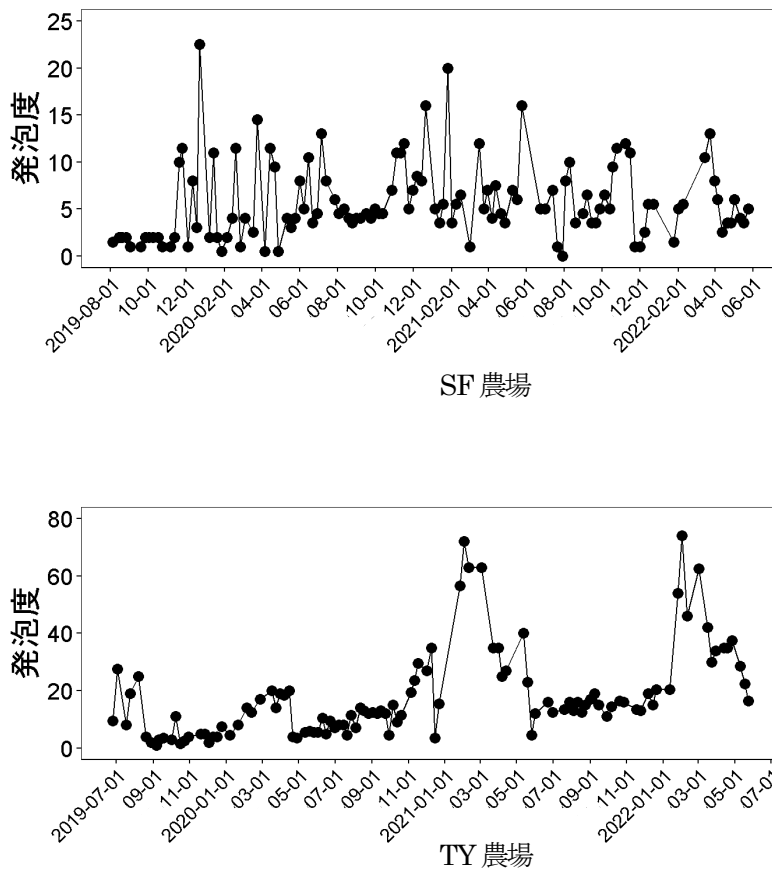


図 3. SF 農場と TY 農場における発泡度の経時変化

汚水浄化施設の異常発泡

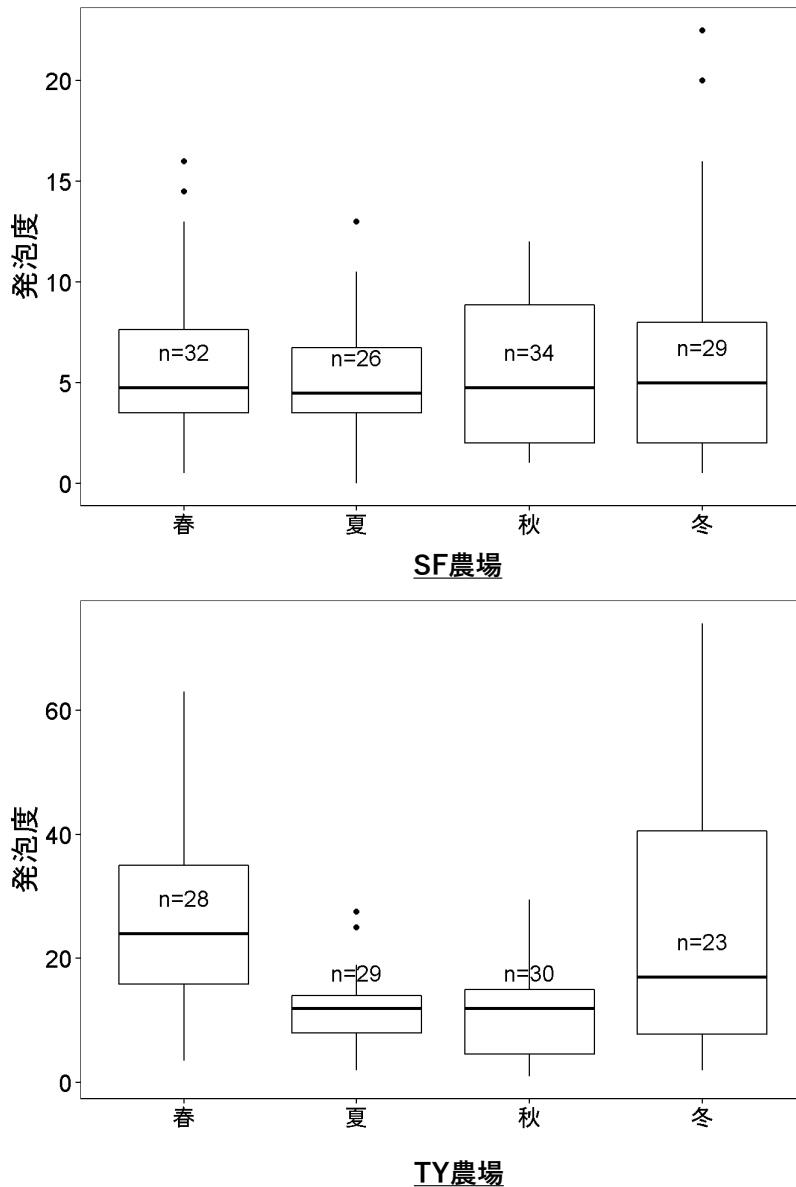


図4. 季節別の発泡度の分布

(春：3～5月、夏：6～8月、秋：9～11月、冬：12～2月)
 (各 box の中央線は中央値、上辺は75パーセンタイル値 (3Q)、ひげの上端は外れ値を除外した最大値、黒丸は外れ値 (3Q+IQR×1.5より大きい値) を示す。nはサンプル数を示す。)

水温期に異常な発泡により覆蓋を押し上げスカムがあふれ出すことがあり苦慮している」という葛西・前保[3]の報告と一致している。

SF農場とTY農場の全データにより、測定

項目間の相関行列を作成した(図5)。その結果、発泡度は水温 ($r=-0.419$) およびEC ($r=0.767$) との間に比較的高い相関係数を示した。pHとの関係を見ると、TY農場では決定係数0.526の有意な正の相関があった。この結果は、低いpHを維持することが異常発泡抑制に重要という葛西・前保の指摘[3]と一致する。なお、葛西・前保[3]によると発泡は処理水の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度とも関係があるとしているが、今回の実測データからは特定の関係性は見いだせなかった(図6)。

次に、発泡度を目的変数、曝気液全水質項目(水温、pH、EC、MLSS、粘度、ろ紙ろ過量)を説明変数とした決定木分析を行った。まず、R[6]のplotcp関数によりcp値と予測誤差(xerror)の関係をプロットした(図7)。このプロットから、1SEルールに基づく適正cp値を求めると0.24となった。cp値0.24で剪定した決定木をrpart関数で作成すると図8が得られた。作成された決定木は、ルートノードがECで、9.045 mS/cmを閾値としてそれ以下ではさらにECで分枝し、閾値4.45 mS/cm未満では最も発泡度が小さくなった。ECが4.45～9.045 mS/cmでは発泡度が2番目に低かった。ECが

汚水浄化施設の異常発泡

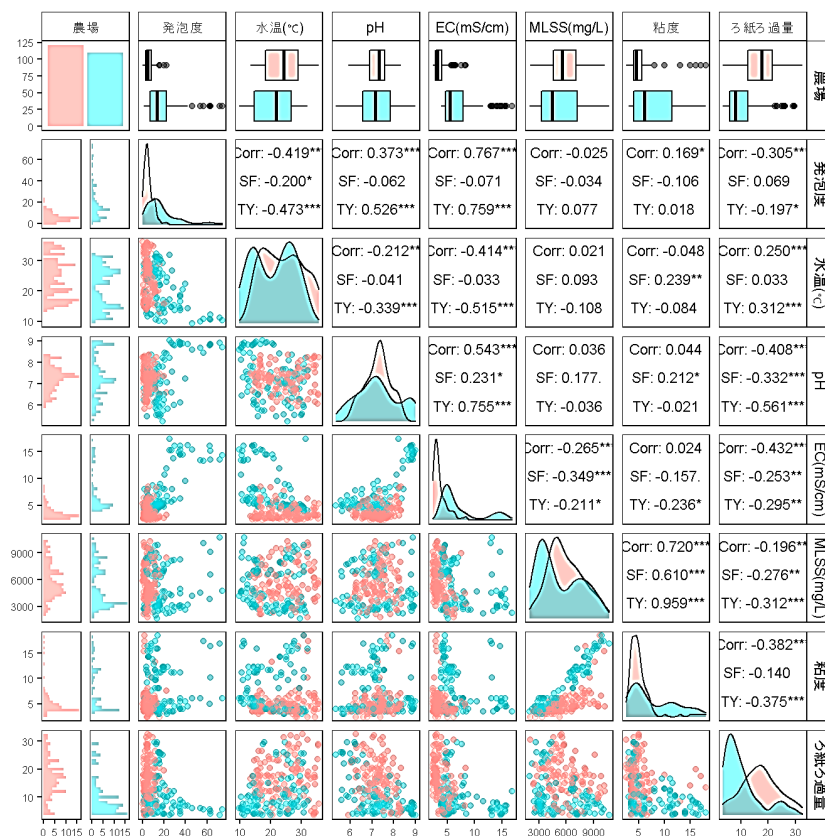


図5. 発泡度およびその他水質項目の相関行列

(赤色 : SF 農場、青色 : TY 農場。対角線より右上側の各ボックス内において、Corr はSF 農場と TY 農場の全データによる相関係数、SF はSF 農場単独での相関係数、TY はTY 農場単独での相関係数を示す。また、相関の p 値は以下で示される。0: '***', 0.001: '**', 0.01: '*', 0.05: '.', 0.1: ' ')

9. 045mS/cm 以上では、さらに水温で分枝し、水温 13.3°C 未満で最も高い発泡度を示し、13.3°C 以上では 2 番目に高い発泡度を示した。EC と水温以外の項目は決定木の決定要因に含まれず、発泡度との関係性は低いことが示唆された。

次に、決定木分析で抽出された水温と EC の 2 要因を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、相関係数 0.775 の重回帰式が得られた。重回帰式による推定値と実測値との関係を図9に示した。発泡度実測値が 50 以上では推定値との乖離が大きくなったものの、それ以下では良好な一致が見られた。

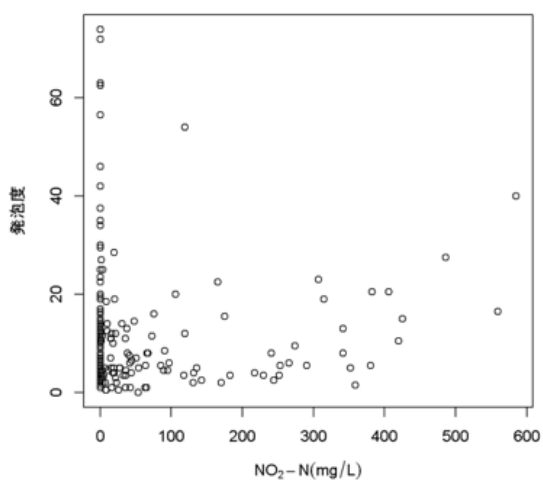


図6. 処理水 NO₂-N 濃度と発泡度の関係

汚水浄化施設の異常発泡

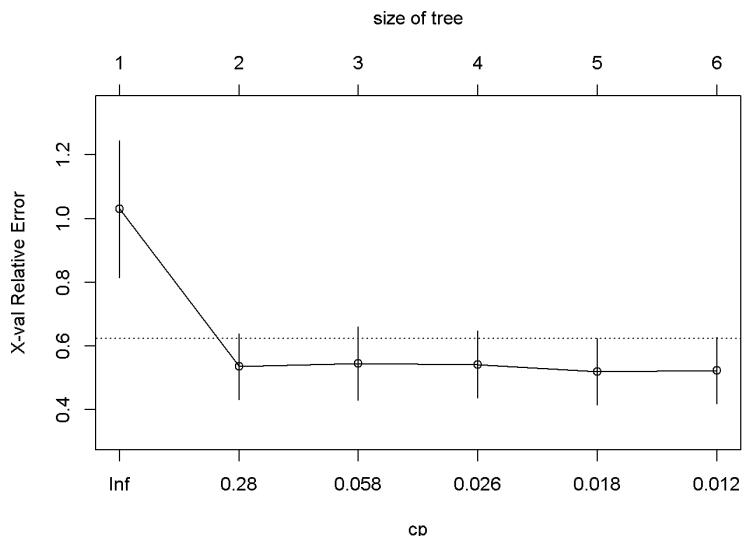


図7. 発泡度の決定木分析におけるcp値—予測誤差プロット

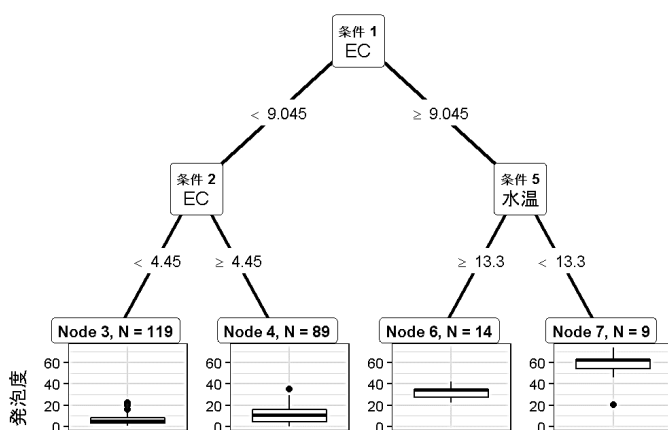


図8. 発泡度に関する剪定処理後の決定木

以上の結果より、ECがおよそ9 mS/cmを超えた際には発泡を警戒し、特に水温が13.3℃未満かつECが9 mS/cm以上になった際には速やかに消泡剤散布を行える準備が重要と考えられた。なお、冬期の最低水温は、SF農場が約15℃なのに比較して、TY農場は約10℃と低く、冬期のECはSF農場が約10 mS/cmに比較してTY農場は約15 mS/cmと高い。これらの差がSF農場とTY農場の発泡度

に差をもたらしたと推測される。

なお、実験室で測定した発泡度と実際の曝気槽での泡層厚は必ずしも一致しないと考えられる。なぜなら、現場での発泡は曝気強度や曝気の気泡径によっても影響されると想定されたためである。よって、高い発泡度が測定された場合であっても、現場においては曝気強度を低下させれば越流層厚までには至らない場合もあると考えられる。現場での曝気強度と泡層厚の関係把握も重要ではあるが、発泡状況は曝気槽の位置によって大きく相違する上に、実施設では通気量の把握も困難であるため定量的な知見を得ることは現実的には困難と思われる。代替手段として、発泡度を何段階かの異なる通気量条件で測定することで、曝気強度の影響を具体的に把握できる可能性もある。この点は今後の検討課題である。

発泡による汚泥流出を防ぐ現実的な対応策として、曝気槽の水面上にECセンサを設置し発泡層上面がセンサに触れて急激にEC値が変化した場合に消泡剤を自動散布するシステムの設置も選択肢になる。ただし、年に数回程度の事態のためにシステムを設置し維持していくことについて費用対効果の観点から慎重な検討を要する。より簡易な対応策として、固形シリコン消泡剤を水面上に吊り下げておき、発泡層が肥厚して消泡剤に

汚水浄化施設の異常発泡

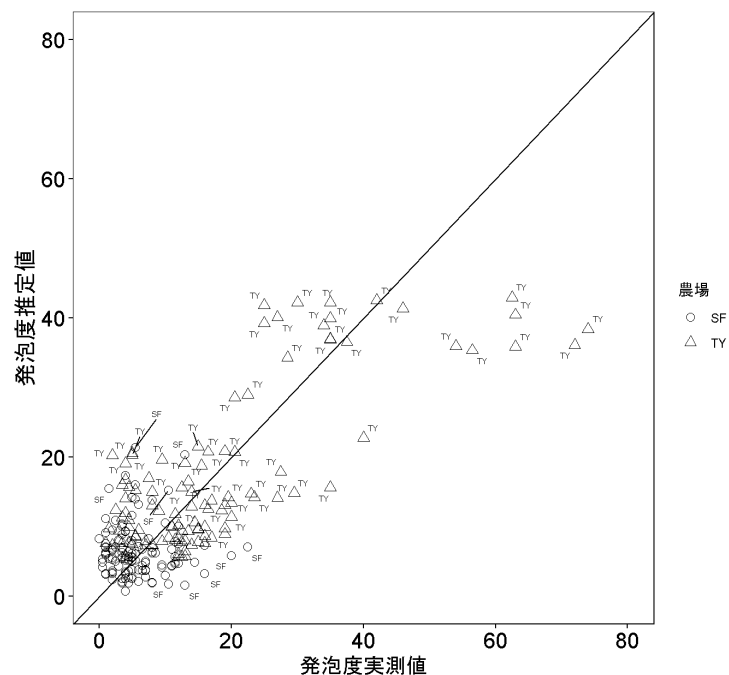


図9. 水温とECを説明変数とする発泡度の重回帰分析結果
(発泡度 = $2.037 + 2.787 \cdot \text{EC} - 0.232 \cdot \text{水温}$
 $r = 0.775$ 、 p 値 $< 2.2e^{-16}$)

触れると自然に溶解し消泡効果を発揮する手法も考えられる。実効性については今後の検討課題である。ただし、膜分離が導入されている施設ではシリコン消泡剤は膜のろ過性能を阻害するので使用できない。スマートホンで遠隔監視できるオンラインカメラを曝気槽に設置し、随時発泡状態を視認できるようにすることは現実的に有効であろう。

謝 辞

本研究は日本中央競馬会畜産振興事業の研究助成によるものであることを記し謝意を表します。また、調査にご協力いただいた農家の方々、および水質分析を担当された畜産環境技術研究所の矢田部枝恵子さん、深谷直美さんに深く感謝いたします。

文 献

[1] 有賀友紀、大橋俊介(2019) RとPythonで学ぶ実践的データサイエンス&機械学習. P416、株式会社技術評論社、東京。

[2] 藤田正憲(1996) 下水処理における障害微生物の制御. 日本水処理生物学会誌, Vol. 32(3):143-148.

[3] 葛西孝司、前保竜一(2016) 放線菌による異常発泡抑制策. 東京都下水道局技術調査年報-2016-, Vol. 40:96-104.

[4] (社) 日本水環境学会・膜を利用した水処理技術研究委員会編 (2008) 水循環の時代 膜を利用した水再生. 技法堂出版、東京。

[5] 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。

[6] R CORE TEAM (2020) R: A language and environment for statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>