

学 位 論 文 題 名

Performance evaluation of hybrid sub-surface constructed wetland system in treating milking parlor wastewater under cold climatic conditions

(寒冷気候条件下で酪農パーラー排水を浄化処理する
ハイブリッド伏流式人工湿地システムの機能評価)

学位論文内容の要旨

酪農パーラー排水は、一般にフリーストール式牛舎に付帯する搾乳舎（パーラー）から排出される汚水で、搾乳機やパイプラインなどの洗浄水、床洗浄時の糞尿や廃棄乳、各種洗剤などが混ざる有機性汚濁濃度の高い汚水である。排出量が通常 1 日 50 m³ を越えないため、現在は法規制の対象となっていないが、水系汚濁源となりやすく、経済的かつ省力的、効果的な排水処理が求められている。

人工湿地による浄化処理は、経済的・省力的な浄化方法の一つとして近年開発が進められている。汚水浄化を目的とした人工湿地には、湛水状態で汚水を流す表面流式と、地下水状態で浄化させる伏流式がある。表面流式は面積あたりの浄化能が低く、また寒冷地では冬季の浄化ができないという問題がある。それに対し伏流式は、表面流式よりも面積あたりの浄化能が高く、冬季でも浄化が維持できるという特徴がある。この伏流式には、汚水を間欠的に濾床表面に散布する縦型（鉛直流式）湿地と、浅い地下水として横向きに緩漫に流す横型（水平流式）湿地がある。縦型が好氣的（酸化的）条件であるのに対し、横型は嫌氣的（還元的）条件となる。この縦型湿地と横型湿地を組み合わせたシステムはハイブリッド伏流式人工湿地システムと呼ばれるが、まだ普及は進んでおらず、浄化能力が高くコストパフォーマンスに優れたシステムとして期待されている。

本研究は、2006 年秋に北海道北部遠別町の酪農家に設置されたパーラー排水処理のためのハイブリッド伏流式人工湿地システムについて、その浄化機能を評価することを目的とした。特に、システム全体での負荷除去率や浄化率、経年的な浄化機能の変動、および冬季・融雪期の浄化能について水質項目別に評価した。

対象とした人工湿地は、成牛約 120 頭を飼育する酪農牛舎に併設された、縦型湿地 2 段（以下、VFA と VFB と称する）、横型湿地 1 段（以下、HF と称する）の計 3 段の濾床からなるハイブリッド伏流式人工湿地システムである。各濾床の面積は、VFA と VFB が各 160m²、HF が 336m² で、VFA と VFB には間欠的に汚水を散布する自動サイホン装置が設けられている。分析用の採水は 2006 年 11 月から 2010 年 10 月までほぼひと月に 1 回の頻度で行った。採水は、VFA 流入前の原水（S1）、VFA 通過後（S2）、VFB 通過後（S3）、HF 通過後の最終処理水（S4）の、4 つを対象とした。採水時に DO、pH、ORP、EC を計測するとともに、実験室において TSS、COD、BOD、TN、NH₄-N、NO₃-N、TP、Org.-P、PO₄-P、TC、大腸菌群数（T. Coliform）を

水質分析によって求めた。システムを通過する流量はサイホン槽やポンプピットに設置した水位計のデータから各槽の通過流量として求めたほか、S4 には量水堰を設置して計測した。各点の水温も同時に計測した。また融雪期の浄化機能を調べる目的で 2008 年と 2010 年の 3〜4 月には S4 に自動採水器を設置した。2008 年は 3 月 5 日から 4 月 17 日の間 1 日 1 回の採水、2010 年は 3 月 19 日から 4 月 14 日の間、1 日 2 本のコンボジット採水（採水は 2 回／本）を行い、上記とほぼ同様の分析に供した。

調査期間中、システムには平均 $4.9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ の汚水の流入があったが、その変動は $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ から $36.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ におよび、特に融雪期と大雨時に増大した。

原水の平均的な水質性状は次のとおりであった；pH 6.6、EC $1.3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、DO $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、ORP 214 mV、TSS $758 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD $4,379 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、BOD $1,527 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Org.・P $4.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN $179 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TC $1,490 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、T. Coliform 207 (no.*1,000) ml^{-1} 。

各水質項目について、システム全体による負荷除去率をみると、TSS は 98%、COD は 91%、BOD は 90%という高い除去率が得られた。またこれら項目には季節的、経年的な除去率の変動も小さく、ほぼ安定して浄化されていた。TN の負荷除去率は 78%、TP は 74%であった。大腸菌群数の除去率は季節を問わず 99%以上であった。

2008 年 6 月からは更なる浄化機能の向上のために、濾床表面の交互乾燥（VFA と VFB、非積雪期のみ）、ならびに処理水の再循環（VFB）を始めた。その結果、VFB での TN 除去率が 37% から 52%に向上した。また $\text{NH}_4\text{-N}$ と TP も除去率が改善された。

水系への放流という観点からみると、処理水の濃度も重要な指標である。システム全体の浄化機能を、最終処理水（S4）の平均濃度でみると、TSS $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD $297 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、BOD $122 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ となり、多くの項目でほぼ水質基準を達成していた。また原水からの濃度減少率を浄化率としてみると、TSS 98%、COD 92%、BOD 92%、TP 75%、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 78%、TN 81%、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 68% となった。

本システムでは水質項目毎に浄化の生じる濾床が異なることが想定される。分析の結果、有機態窒素の除去は VFA で、無機態窒素の除去は VFB でより効果的に生じていることが判明した。BOD の除去は VFA よりも VFB と HF でより割合が高かった。2008 年と 2009 年の夏季・秋季に $\text{NO}_3\text{-N}$ が VFA の出口で認められたことから、この時期に VFA で $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化が進んだとみられるが、同じ現象は 2007 年には認められなかった。これはこの時期の高い負荷投入のためと推察される。HF からの排水に $\text{NO}_3\text{-N}$ は検出されなかったことから、HF で脱窒されたものとみられる。

融雪期には最大 $24.9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ の融雪水を含む汚水が流入した。2008 年融雪期の各水質項目の除去率や浄化率は通年値に比べ低下したが、これは沈殿槽からの想定外の流入の発生によることが明らかとなった。これを防いだところ、2010 年融雪期には浄化率は非融雪期よりも向上した。融雪期の一連の観測を通じて、水質項目によっては一時的な除去率や浄化率の低下が認められたものの、システムの機能を損なうものではなく、年間を通じて良好な浄化機能が発揮できることが確認できた。

本研究より、ハイブリッド伏流式人工湿地システムは、負荷の変動や冬季・融雪期の寒冷気候条件にも対応できる冗長性を有することが確認された。特に TSS、COD、BOD については 90%を超える負荷除去率を維持していた。これらのことから、本システムが寒冷地でも継続利用が可能な、効率の良い有機性汚濁排水の浄化処理方法であることを提示した。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 井 上 京
副 査 教 授 長 澤 徹 明
副 査 教 授 波多野 隆 介

学 位 論 文 題 名

Performance evaluation of hybrid sub-surface constructed wetland system in treating milking parlor wastewater under cold climatic conditions

(寒冷気候条件下で酪農パーラー排水を浄化処理する
ハイブリッド伏流式人工湿地システムの機能評価)

本研究は、2006 年秋に北海道北部遠別町の酪農家に設置されたパーラー排水処理のためのハイブリッド伏流式人工湿地システムについて、その浄化機能を評価することを目的としたものである。特に、システム全体での負荷除去率や浄化率、経年的な浄化機能の変動、および冬季・融雪期の浄化能について水質項目別に評価したものである。

酪農パーラー排水は、一般にフリーストール式牛舎に付帯する搾乳舎（パーラー）から排出される汚水で、搾乳機やパイプラインなどの洗浄水、床洗浄時の糞尿や廃棄乳、各種洗剤などが混ざる有機性汚濁濃度の高い汚水である。排出量が通常 1 日 50 m³ を越えないため、現在は法規制の対象となっていないが、水系汚濁源となりやすく、経済的かつ省力的、効果的な排水処理が求められている。

人工湿地による浄化処理は、経済的・省力的な浄化方法の一つとして近年開発が進められている。汚水浄化を目的とした人工湿地には、湛水状態で汚水を流す表面流式と、地下水状態で浄化させる伏流式があるが、表面流式と違って伏流式は冬季でも浄化が維持でき、面積あたりの浄化能が高いとされている。伏流式には、汚水を間欠的に濾床表面に散布する縦型（鉛直流式）湿地と、浅い地下水として横向きに緩慢に流す横型（水平流式）湿地があり、この 2 つを組み合わせたシステムはハイブリッド伏流式人工湿地と呼ばれ、浄化能力が高くコストパフォーマンスに優れたシステムとして期待されている。

研究の対象とした人工湿地は、成牛約 120 頭を飼育する酪農牛舎に併設された、縦型湿地 2 段（以下、VFA と VFB と称する）、横型湿地 1 段（以下、HF と称する）の計 3 段の濾床からなるハイブリッド伏流式人工湿地システムである。各濾床の面積は、VFA と VFB が各 160m²、HF が 336m² で、VFA と VFB には間欠的に汚水を散布する自動サイホン装置が設けられている。調査期間中、システムには平均 4.9 m³・d⁻¹ の汚水の流入があったが、その変動は 1.2 m³・d⁻¹ から 36.2 m³・d⁻¹ におよび、特に融雪期と大雨時に増大した。

分析された各水質項目について、システム全体による負荷除去率をみると、TSS は 98%、COD は 91%、BOD は 90% という高い除去率が得られた。またこれら項目には季節的、経年的な除去率の変動も小さく、ほぼ安定した浄化効果を発揮していた。TN の負荷除去率は 78%、TP は 74% であった。大腸菌群数の除去率は季節を問わず 99% 以上であった。

2008 年 6 月からは更なる浄化機能の向上のために、濾床表面の交互乾燥 (VFA と VFB、非積雪期のみ)、ならびに処理水の再循環 (VFB) を開始した。その結果、VFB での TN 除去率が 37% から 52% に向上した。また $\text{NH}_4\text{-N}$ と TP も除去率が改善した。

水系への放流という観点からみると、処理水の濃度も重要な指標である。システム全体の浄化機能を、最終処理水 (S4) の平均濃度でみると、TSS $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD $297 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、BOD $122 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ となり、多くの項目ではほぼ水質基準を達成していた。また原水からの濃度減少率を浄化率としてみると、TSS 98%、COD 92%、BOD 92%、TP 75%、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 78%、TN 81%、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 68% となった。

融雪期には最大 $24.9 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ の融雪水を含む汚水が流入した。2008 年融雪期の各水質項目の除去率や浄化率は通年値に比べ低下したが、これは沈殿槽からの想定外の流入の発生によることが明らかとなった。これを防いだところ、2010 年融雪期には浄化率は非融雪期よりも向上した。融雪期の一連の観測を通じて、水質項目によっては一時的な除去率や浄化率の低下が認められたものの、システムの機能を損なうものではなく、年間を通じて良好な浄化機能が発揮できることが確認された。

本研究より、ハイブリッド伏流式人工湿地システムは、負荷の変動や冬季・融雪期の寒冷気候条件にも対応できる冗長性を有することが確認された。特に TSS、COD、BOD については 90% を超える負荷除去率を維持していた。これらのことから、本システムが寒冷地でも継続利用が可能な、効率の良い有機性汚濁排水の浄化処理方法であることを提示した。

よって、審査員一同は、プラディーブ・クマール・シャルマが博士 (農学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。