

## (71) 畜産排水を処理する 多段鉛直流人工湿地の性能評価

千木良 純貴<sup>1\*</sup>・中野 和典<sup>1</sup>・宋 海亮<sup>1</sup>・千葉 信男<sup>1</sup>  
野村 宗弘<sup>1</sup>・西村 修<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

\* E-mail: chigira@eco.civil.tohoku.ac.jp

小規模分散型の新しい排水処理技術として注目されている人工湿地のスタートアップ時や冬季の処理性能に関する知見は乏しい。本研究では、2009年6月から運転を開始した多段鉛直流人工湿地において、処理水の水質モニタリングを行い、人工湿地のスタートアップから冬期にかけての性能を評価した。その結果、人工湿地がスタートアップ時でも排水処理施設に求められる性能を十分に有していることが分かった。また、単位面積あたりの流入汚濁負荷と汚濁除去量に正の相関が見られたが、汚濁物質の流入濃度や流入水量の著しい増加が認められないにも関わらず冬期に除去率が低下したことから、11月以降の冬期において水質浄化プロセスに何らかの変化があった可能性が考えられた。

**Key Words :** Vertical flow constructed wetland, Livestock farming effluent, Start-up, Winter season

### 1. はじめに

平成20年度の農林水産省のデータによれば、畜産の現場において、処理施設を利用せずに家畜糞尿処理を行っている農家は、全農家の約78.7%に上っている。施設償却費を含めた家畜糞尿処理費用は畜産経営総費用の約12%に、家畜糞尿処理労働は総労働の約13%になる<sup>1)</sup>ことから、汚濁負荷の高い家畜尿汚水を一般的な下水処理方法で処理するにはコスト面、労力面で難があるためであると考えられる。実際に畜産の現場で利用されている代表的な排水処理技術として連続式活性汚泥法や散水濾床法が挙げられるが、維持管理が煩雑で施設費、維持管理費が高価である<sup>2)</sup>ことから普及が停滞している現状にある。故に畜産の現場では簡易かつ省力的で機能の安定した、低コストな技術が求められている<sup>3)</sup>。

このような背景から、施設建設費、維持管理費が安く、運転管理に特殊な技術を必要とせず、排水の流入に必要な最低限のエネルギーのみでの運転が可能な水質浄化法である人工湿地法が注目されている。人工湿地とは、排水処理のために人為的に造成した湿地のことを言い、必要とする敷地面積は処理水量に依存する<sup>4)</sup>ため、土地利用が十分に可能な場合、十分に畜産の現場で適用可能な技術であると考えられる。

人工湿地では、物理的なろ過・吸着作用と、生物学的な

植物による吸収、微生物による分解により水質浄化が行われる<sup>5)</sup>が、生物学的機能が不安定なスタートアップ時、あるいはその機能が低下すると考えられる冬季における処理性能を調査した事例は少ない。そのような時期の知見が乏しいことは、人工湿地の、排水処理技術としての導入を阻む要因になると考えられる。

そこで本研究では、2009年6月から東北大学川渡フィールドセンター内で運転を開始した、畜産排水を処理する鉛直流人工湿地の冬季を含めたスタートアップ年度の処理性能について評価した。

### 2. 人工湿地の概要及び調査方法

#### (1) 多段鉛直流人工湿地の概要

本研究で対象とした多段鉛直流人工湿地の概要及び処理フローを図1に示す。総面積111 m<sup>2</sup>の人工湿地は想定される有機物負荷に対応した面積の5段の湿地から構成され、それぞれの段は、①植栽・不飽和区画(VU)、②無植栽・不飽和区画(UU)、③植栽・半飽和区画(VH)に分画されている。各区画はさらに同一条件の4つの湿地に分けられている。植栽にはヨシ(*Phragmites australis*)を用いた。処理フローであるが、処理対象水はまずポンプ槽へ貯留され、ポンプ槽での貯留水量が一定量を越えるとポンプが稼働し、処理対象水はサイフォン槽に流入する。

サイフォン槽でも同様に、貯留水量が一定量を越えるとサイフォンが稼動し、処理対象水は分水槽へと流入する。ポンプが1回稼動した時にサイフォン槽へ流入する水量は、サイフォンが1回稼動するために必要な水量に調節されている。分水槽は①～③の各区画への流入口があり、各流入口の蓋を開閉することで流入させる区画を選べるようになっている。分水槽を通過した処理対象水は人工湿地へと流入し、人工湿地を通過した後サンプリング槽へと流入する。サンプリング槽を通過した処理対象水は次の段のポンプ槽へと流入する。次の段においても同様に上記のフローを辿る。このフローを5段目まで繰り返す、最終的に処理水として人工湿地外へ排水される。

次に各区画の断面図を図2に示す。図2において①VUの植栽が無い状態が②UUである。処理対象水は各区画の上部に設置された散水パイプを通り人工湿地へと流入する。流入した処理対象水は湿地基盤中を鉛直方向に通過して地下に設置された排水パイプから排水される。①及び②の不飽和区画は地下水位がなく、③の半飽和区画は排水流入時以外の地下水位を30 cmに保っている。②無植栽・不飽和区画は植栽の有無による処理能力の変化を、③植栽・半飽和区画は湿地基盤内の下半分を水飽和状態に保つことによる処理能力の変化を検討するために設置したが、本研究期間中においては3つの区画での汚濁物質除去能力に差が見られなかったため、3区画の違いについては議論から除外する。また人工湿地の地下部

は遮水シートで分画されているため、処理対象水の土壌浸透及び地下水の人工湿地内への流入はない。

次に湿地基盤の材料及び構成を図3に示す。発泡コンクリート(ALC)は粒径10 mm程度に粉碎された状態で表層に敷き詰められており、リン吸着とアルカリ度の安定化を目的としている。また、ろ過層において段を追うごとに基盤材料の粒径を小さくすることで、ろ過による懸濁物質の除去効率を上昇させるねらいがある。

2009年6月2日に30頭の乳牛を飼育する牛舎排水の流入を開始し、それに加えて8月7日より乳牛の運動場からの雨天時流出水を入れた。

## (2) 調査方法

本人工湿地の運転を開始した2009年6月2日から、乳牛の運動場からの雨天時流出水の流入を開始した2009年8月7日までの約2ヶ月間を試運転期間とし、人工湿地の①～③の全区画に同時に処理対象水を流入させた。試運転期間中は、6月14日、7月6日、7月30日の3回、流入水と各段の排水パイプからの流出水のサンプリングをポンプ槽及びサンプリング槽にて行った。試運転期間として設けた約2ヶ月間で良好なBOD<sub>5</sub>、T-N除去が行われたため、2009年8月8日以降を本運転期間とし、2010年1月まで3日ないし4日交代で3区画に順番に処理対象水を流入させる、ローテーション運転を行った。本運転期間中は、各月3回、各系につき1回ずつ、流入

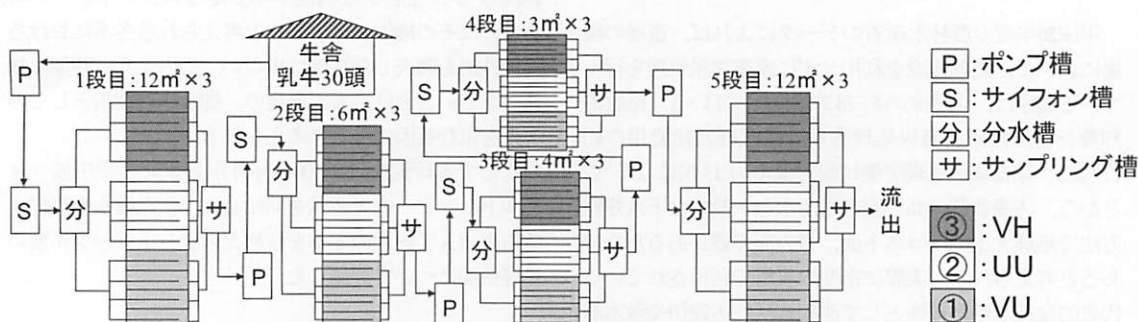


図1 多段鉛直流式人工湿地の概要及び処理フロー

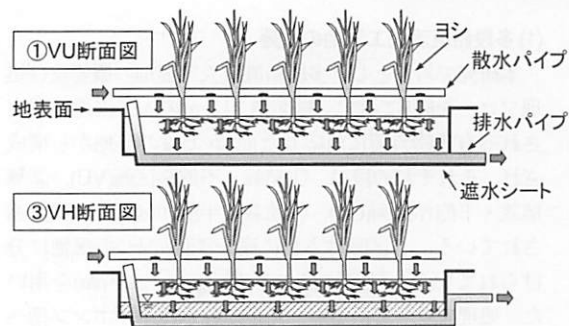


図2 各区画の断面図

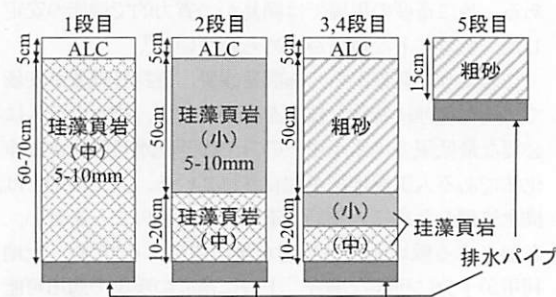


図3 湿地基盤の材料及び構成

水と各段の排水パイプからの流出水のサンプリングを行った。各サンプルのBOD<sub>5</sub>、SS、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N及びT-N濃度を下水試験方法に従って測定し、TKN濃度はT-N濃度からNO<sub>2</sub>-N濃度とNO<sub>3</sub>-N濃度を引くことで算出した。また、気温、水温及びポンプ稼働回数をポンプ槽に設置した圧力センサにより自動測定し、ポンプ稼働回数とポンプ稼動1回あたりの排出水量から流入水量を計算した。

### 3. 結果

#### (1) 試運転期間

気温、水温、流入水量の推移、流入水と5段目流出水のBOD<sub>5</sub>、T-N、TKN濃度及び除去率の推移を図4に示す。

BOD<sub>5</sub>に関しては、6月14日(12日)ではBOD<sub>5</sub>濃度 650 mg/lの流入水に対して流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が 1.2 mg/l、7月6日(34日)ではBOD<sub>5</sub>濃度 510 mg/lの流入水に対して流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が 1.2 mg/l、7月30日(58日)ではBOD<sub>5</sub>濃度 1,600 mg/lの流入水に対して流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が 1.6 mg/lであった。いずれのサンプリング日においても除去率が99%を上回り、極めて良好なBOD<sub>5</sub>除去が行われていた。

本人工湿地の処理対象である牛舎は、工場又は事業場に係る排水基準は適用されないが、本人工湿地の流出水の汚濁濃度と1日あたりの排出水量が50 m<sup>3</sup>以上の工場又は事業場に対する排水基準値と比較すると、馴致期間中の全てのサンプルにおいて、流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が宮城県のBOD<sub>5</sub>濃度の排水基準である160 mg/lを十分に満たす結果となり、人工湿地が立ち上げ直後から十分なBOD<sub>5</sub>除去性能を有していることが分かった。

TKNに関しては、6月14日(12日)ではTKN濃度 18 mg/lの流入水に対して流出水のTKN濃度が 0.10 mg/l、7月6日(34日)ではTKN濃度 42 mg/lの流入水に対して流出水のTKN濃度が 0.42 mg/l、7月30日(58日)ではTKN濃度 72 mg/lの流入水に対して流出水のTKN濃度が 2.9 mg/lであった。3回のサンプリングにおける平均除去率は98.2%となり、良好なTKN除去が確認された。

T-Nに関しては、6月14日(12日)ではT-N濃度 20 mg/lの流入水に対して流出水のT-N濃度が 0.45 mg/l、7月6日(34日)ではT-N濃度 43 mg/lの流入水に対して流出水のT-N濃度が 0.58 mg/l、7月30日(58日)ではT-N濃度 72 mg/lの流入水に対して流出水のT-N濃度が 13 mg/lであった。3回のサンプリングにおける平均除去率は92.6%であった。馴致期間中の全てのサンプルにおいて、原水のT-N濃度が宮城県のT-N濃度の排水基準である120 mg/lを満たしており、結果として流出水のT-N濃度も排水基準を満たす形となった。

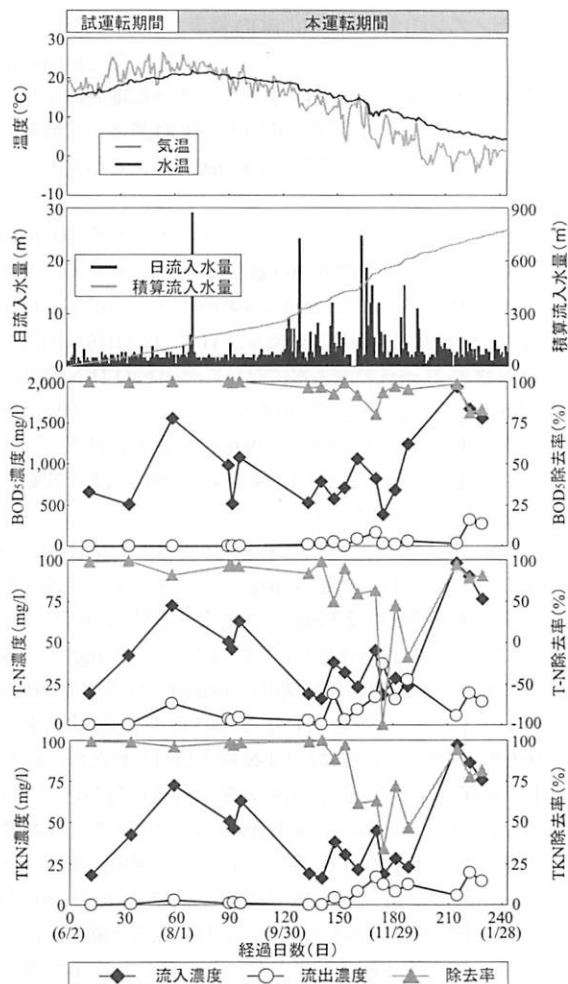


図4 運転条件及びBOD<sub>5</sub>、T-N、TKN濃度と除去率の推移

#### (2) 本運転期間

BOD<sub>5</sub>に関しては、9月3日(93日)のサンプルから11月5日(156日)のサンプルまでは、平均BOD<sub>5</sub>濃度 700 mg/lの流入水に対して流出水の平均BOD<sub>5</sub>濃度は 17 mg/lと良好なBOD<sub>5</sub>除去が行われていたが、1週間後の11月12日(163日)のサンプルから流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が高い値を示し始め、11月22日(173日)のサンプルでは160 mg/lまで上昇した。12月に入ると12月3日(184日)のサンプルの流入BOD<sub>5</sub>濃度が680 mg/lであったのに対し、12月10日(191日)のサンプルの流入BOD<sub>5</sub>濃度が1,200 mg/lを超えるなど安定しない流入水に対して、流出水のBOD<sub>5</sub>濃度は常に100 mg/lを下回っていた。1月の3回のサンプルにおいては流入水のBOD<sub>5</sub>濃度がいずれも1,500 mg/lを上回り高い流入BOD<sub>5</sub>濃度が続いていた。そのような流入水に対し、1月7日(219日)のサンプルの流出BOD<sub>5</sub>濃度は30 mg/lとなり良好な除去が行われたが、1月14日(226日)

のサンプルでは、流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が 320 mg/lと再び上昇し、1 月 21 日(233 日)のサンプルでも、流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が 270 mg/lと高い値であった。本運転期間の全サンプリング 9 回中 3 回分の流出水のBOD<sub>5</sub>濃度が宮城県の水質基準である 160 mg/lを超える結果となった。

TKNに関しては、9 月 3 日(93 日)から 11 月 5 日(156 日)までは、平均 TKN 濃度 36 mg/lの流入水に対して流出水の平均 TKN 濃度は 13 mg/lで平均除去率が 96.7 %と良好な TKN 除去が行われていたが、11 月 12 日(163 日)には TKN 濃度 21 mg/lの流入水に対して流出水の TKN 濃度が 8.2 mg/lとなり、除去率は 61.6 %に低下した。その後は流入水の TKN 濃度の変動幅が 19 mg/lから 97 mg/lまでと非常に大きくなり、除去率も 34.3 %から 94.3 %まで変動し、安定しない傾向にあった。

T-Nに関しては、9 月 3 日(93 日)から 10 月 22 日(142 日)までは、平均 T-N 濃度 36 mg/lの流入水に対して流出水の平均 T-N 濃度は 29 mg/lと良好な T-N 除去が行われていたが、10 月 29 日(149 日)では、T-N 濃度 38 mg/lの流入水に対して流出水の T-N 濃度は 19 mg/lで除去率は 49.9 %に低下した。その後、11 月 5 日(156 日)には除去率が 90.0 %となり、再び良好な T-N 除去が行われたが、11 月 12 日(163 日)には除去率が再び 50 %程度に落ち込み、11 月 26 日(177 日)と 12 月 10 日(191 日)には流入水の T-N 濃度よりも流出水の T-N 濃度が高くなる現象が確認された。結果として、11 月 26 日(177 日)、12 月 10 日(191 日)の除去率はマイナスとなった。1 月に入ると除去率は安定し、70 %を上回る結果となった。流出水の T-N 濃度が 120 mg/lを超過した日はなく、宮城県の水質基準は満足する結果となった。

#### 4. 考察

本研究で得られたデータを、単位面積あたりの汚濁流入負荷と、それに対する汚濁除去量の関係で整理することを試みた。単位面積あたりの汚濁流入負荷は、流入水の汚濁濃度に 1 日の流入水量を掛け流入面積で除することで、汚濁除去量は流入水の汚濁濃度から流出水の汚濁濃度を引き、それに 1 日の流入水量を掛け流入面積で除することで、それぞれ算出した。その結果を図 5 に示す。図 5 からBOD<sub>5</sub>、T-N、TKNのどの水質の単位面積あたりの汚濁流入負荷と汚濁除去量の関係にも比例関係があることが分かった。単位面積あたりの汚濁流入負荷と汚濁除去量の関係に正の相関が見られることは既往研究<sup>9)</sup>でも言われており、本研究においても同様の結果となった。これは単位面積あたりの汚濁流入負荷に関わらず一定の割合で汚濁除去が行われたことを示している。しかしながら、流入及び流出水の濃度から算出した除去率

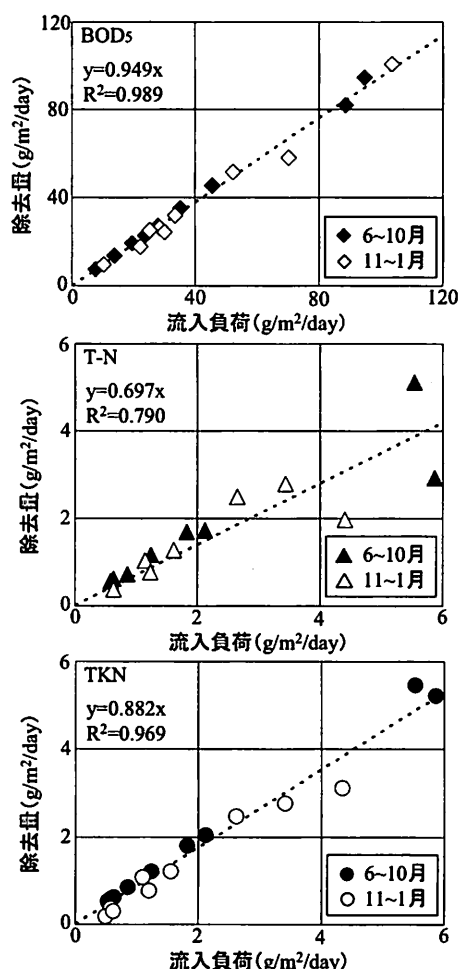


図5 単位面積あたりの汚濁流入負荷と汚濁除去量の関係

(図 4) は 11 月以降の冬期に低下する傾向にあり、量的関係と一致していない。加えて、濃度から算出した除去率が低下する冬期において、著しく汚濁流入負荷が増加した傾向も認められないことから、11 月前後で水質浄化プロセスに何らかの変化があったと考えられる。既往研究から人工湿地における汚濁除去能力の変遷が水温に依る<sup>7)</sup>ことや、生物的水質浄化プロセスは水温により季節パターン<sup>8)</sup>を持つことが知られている。さらに人工湿地における微生物活性は 12 月から 2 月に最も低下し、その期間は、微生物の呼吸や同化はほとんど水質浄化に寄与していない可能性がある<sup>9)</sup>と言われている。物理的な水質浄化プロセスが温度に依らないと仮定すれば、本研究においても、11 月以降の除去率の低下が水温の低下による生物的水質浄化プロセスの減少であった可能性が考えられる。

## 5. 結論

### (1) 本研究のまとめ

本研究では、多段鉛直流人工湿地において、スタートアップから冬期にかけての人工湿地のBOD<sub>5</sub>、T-N及びTKN除去能力を評価した。以下に本研究において得られた知見をまとめる。

- 1) 運転開始から 10 月頃までは、本人工湿地のBOD<sub>5</sub>除去率は常に 99 %を上回り、流出水のBOD<sub>5</sub>濃度も常に宮城県の排水基準を満足しており、T-N、TKNに関しても、安定した除去が行われ、宮城県の排水基準を満足したことから、スタートアップから秋口において人工湿地が良好な水質浄化能力を有することが分かった。
- 2) 11 月以降は、汚濁物質の流入濃度や流入水量の著しい上昇が認められない一方で、汚濁物質の流出濃度が上昇し、除去率が低下する傾向にあった。
- 3) 単位面積あたりの汚濁流入負荷と汚濁除去量の関係に正の相関が見られたことから、量的関係では冬期においてもそれ以前と同等の除去が行なわれていたことが分かった。
- 4) 11 月以降の冬期における除去率の低下は、生物的水質浄化プロセスの減少に起因する可能性が考えられた。

### (2) 今後の展望

今後も継続して本人工湿地における水質モニタリングを行う予定である。今後の水質モニタリングから汚濁除去プロセスの変遷が温度で説明できる可能性が示唆された場合、温度をパラメータとする水質モデルの導入も検討したい。

また、流入水及び流出水の水質を溶存態と懸濁態とで

分けて分析することにより、より詳しい水質浄化プロセスの解明を行ないたい。

謝辞：現場管理及び調査に多大なる協力を頂いた東北工業大学工学部環境情報工学科客員研究員矢野篤男先生に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 農林水産省：畜産物生産費調査報告, 1997
- 2) (社)中央畜産会：畜産環境保全マニュアル改訂版, pp.38-39, 2003
- 3) 羽賀清典：尿污水处理の技術課題, 農山漁村文化協会編, 畜産環境対策大辞典, pp.547-551, 1995.
- 4) 周勝, 細見正明：人工湿地に関する研究と利用の動向, 用水と廃水, Vol.50, No.2, pp.41-49, 2008
- 5) Wallace, S.D. : The wetland wastewater alternative, *Water* 21 February 2007, pp.38-40, 2007
- 6) P.Molle, A.Lienard, C.Boutin, G.Merlin and A.iwema: How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems, *Water Science and Technology*, 51(9), pp.11-21, 2005
- 7) Kadlec, R.H. : Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands, *Water Science and Technology*, 40(3), pp.37-44, 1999
- 8) Kadlec, R.H. and Wallace, S.D. : *Treatment Wetlands*, CRC press, Boca Raton, FL, pp.893, 1996
- 9) Tanner, C.C., Sukias J.P.S. and Upsdell, M.P. : Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel bed constructed wetlands, *J.Environmental Quality*, 27(2), pp.448-458, 1998

(2011. 5. 30 受付)

## Evaluation of the treatment performance of multi stage vertical flow constructed wetlands for livestock farming effluent

Junki CHIGIRA<sup>1</sup>, Kazunori NAKANO<sup>1</sup>, Hai-Liang SONG<sup>1</sup>, Nobuo CHIBA<sup>1</sup>  
Munehiro NOMURA<sup>1</sup>, Osamu NISHIMURA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate school of Engineering, Tohoku University

Although the constructed wetland has been highlighted as a small scale distributed treatment technology, reports about its start-up performance including winter are few. In the present study, a full-scale experimental study was conducted on a 5-stage subsurface vertical flow constructed wetland treating livestock farming effluent and the start-up water purification performance during 8 month operation including winter was evaluated. It was found that the constructed wetland had high treatment potential even at start-up year including winter. There was positive correlation between influent pollutant load and removed load per unit wetland area. However, pollutant removal efficiency dropped to lower values although influent pollutant concentration and water load did not increase. For this reason, it was suggested that water purification processes varied in the winter season.