

平成17年度
霧多布湿原学術研究

湿原植物による酪農雑排水の水質浄化

報 告 書

平成18年3月

浜中町商工観光課

酪農学園大学酪農学研究科

客員助教授 猫本健司

浜中町長 様

猫本 健司

酪農学園大学大学院酪農学研究科客員助教授

オー・アンド・アール技研有限会社帯広事務所

(帯広事務所)帯広市西18条南1丁目14-52

tel.0155-33-1500 fax.0155-33-2672

この度、ご助成を賜り随行了した「平成17年度、湿原植物による酪農雑排水の水質浄化」につきまして、業務が終了いたしましたので、ご報告いたします。

平成18年3月

目次

はじめに	1
ヨシを用いた人工湿地の造成と酪農雑排水の浄化	2
1 背景と目的	2
2 方法	2
(1) 調査対象地の概況	2
(2) 人工湿地の作成方法	3
(3) 植物の選定	4
(4) ヨシの定植方法	4
(5) 生育調査方法	6
(6) 水質、植物体、土壌分析項目と方法	6
(7) 対象とした排水、植物体、土壌	7
3 結果	8
(1) 生育調査結果	8
(2) 成分分析結果	9
4 考察	12
(1) 人工湿地の造成	12
(2) 生育調査	12
(3) 成分分析	13
(4) 人工湿地の今後の展望	14
参考文献	15

はじめに

浜中町農業協同組合(JA浜中町)では、「酪農雑排水」と呼ばれる牛乳処理室やミルクングパーラーで発生する汚水の対策を、全組合員を対象として近年中に実施する計画がある。これを受け、本業務では、湿原地帯である浜中町らしい処理方法のひとつであり、実際の酪農現場で導入しやすいシステムとして、ヨシを用いた人工湿地の造成と、人工湿地による水質浄化を検討したものである。

本業務はJA浜中町ならびに酪農学園大学酪農学部家畜管理学研究室と共同で遂行した。本報告書は同研究室の高沢依公子氏の卒業論文「ヨシを用いた人工湿地の造成と酪農雑排水の浄化」から再編したものである。

また、本業務の遂行にあたっては、JA浜中町の方々をはじめ、酪農学園大学干場信司教授および学生のみなさま、帯広畜産大学・麻布大学・東京農業大学非常勤講師内田泰三博士、霧多布湿原センター高井文子氏ならびに北海道農業研究センター長田隆氏に多大なご協力を頂いた。

なお、本業務の一部は浜中町の霧多布湿原学術研究助成を受けて実現した。

ヨシを用いた人工湿地の造成と酪農雑排水の浄化

1 背景と目的

水は私たちの日々の生活に切っても切り離せないものである。日本は水資源に恵まれた国であり、蛇口から出る水をそのまま飲む国は全世界を見てもそう多くはない。しかし近年、家畜排せつ物から生じた硝酸性窒素による地下水汚染が数々報告されている(例えば志賀[6])。さらに、排水にはクリプトスポリジウムや大腸菌などが含まれている場合もあり、それらの病原菌による集団感染が起こらないとも限らない。

平成16年11月に「家畜排せつ物管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が適用され、牛舎周辺からの汚水流出はかなり減少してきた。しかし、酪農雑排水については、排水の基準はあるものの実質的な規制はまだない。排水は直接河川に流入、または地下浸透しており、環境汚染が懸念される。

酪農雑排水には牛乳搬送用パイプライン、ミルクカー、バルククーラー等の洗浄水、ミルクングパーラーピットの洗い水、廃棄乳などが含まれるが、飼養頭数やふん尿の混入の有無で、排出される排水の量、濃度にかかなりの差がでる(金内[3])。

ふん尿の混ざる高濃度な排水の処理方法としては、膜分離活性汚泥法、オゾン処理法、電気分解法、凝集剤の利用などの研究が進められている(例えば高橋[7])。しかし、ふん尿の混ざらない比較的低濃度な排水の処理方法はあまり研究されていない。膜分離活性汚泥法のような排水処理方法は、大掛かりな施設を必要とするため、低濃度な排水を処理するシステムとしてはコストが高く、手間がかかりすぎる(猫本[5])。低コストで行なえる排水処理方法として、植物による浄化システムの有効性も話題になってきてはいるが、あまり多くの報告はなされていない。

そこで本研究では、実際の酪農現場で導入しやすい、低濃度な排水向けの処理システムとして、ヨシを用いた人工湿地の造成と、人工湿地による水質浄化の検討を目的とした。人工湿地による水質浄化を検討した。

2 方法

(1) 調査対象地の概況

浜中町は太平洋に面した釧路支庁管内の東端に位置しており、酪農業だけでなく漁業も盛

んな町である。年間の平均気温は5.8[°C]と低く、1年を通して冷涼な気候である。春から夏には太平洋岸特有の霧が多く発生し、日差しのさえぎられる日が多く、ぐずつきやすい。また、湿原地帯としても有名であり、2004年にラムサール条約北海道遺産に登録された霧多布湿原が広がっている。環境への影響を極力抑えた自然と生活・産業の調和したまちづくりを目指している[4]。

本業務では浜中町農協就農者研修牧場(以下、研修牧場)に人工湿地を造成するための実証試験区を製作した。研修牧場とは、新規就農を目指す人が酪農の技術を習得するための牧場である。飼養頭数は未經産80頭、経産105頭であり、フリーストール牛舎、パーラー搾乳方式をとっている。

(2) 人工湿地の作成方法

人工湿地の実証試験区(図1)の大きさは、横2m縦18m深さ1mであり、排水の地下浸透を防ぐためのビニルシートで底を覆い、その上に土壌を50cm程度入れた。二列のうち一方にのみヨシを定植させて試験区とし、もう一方を対照区とした。試験区、対照区共に4.5m間隔で3つの採水管が設置されている。採水管はプラスチック製の管を土壌にさしこんだもので、土壌に埋め込まれた部分が網状になっている。採水管は土壌または植物の根による浄化作用を測定するために設置した。

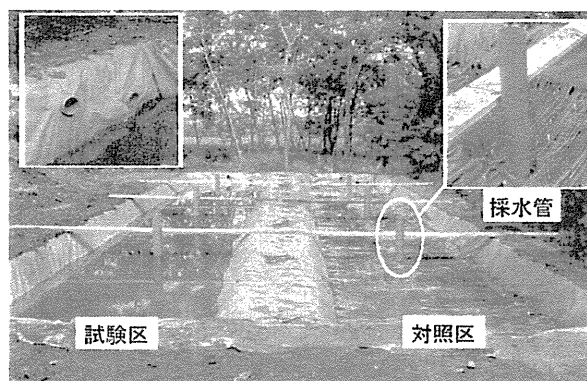


図1 人工湿地の実証試験区

研修牧場(図2)からは、1日約3tの酪農雑排水が排出されており、一度ため池に貯留された後、実証試験区に流入している。実証試験区には約42tの排水を貯留することができ、試験区、対照区の両方へ均等に流入する構造になっている。

冬期にも実証試験区を使用するため、排水の排出口は2箇所設置した(図1)。実証試験区の底より60cmと80cmの位置である。夏期は高さ60cmの排出口より排水させ、冬期は夏期に使用した排出口を塞ぎ止め、高さ80cmの排出口より排水させる。水位を上げることで、凍結した排水は押し上げられ、1年を通して実証試験区の使用が可能になる。夏期の水深は約10cm、冬期の水深は約30cmになる。

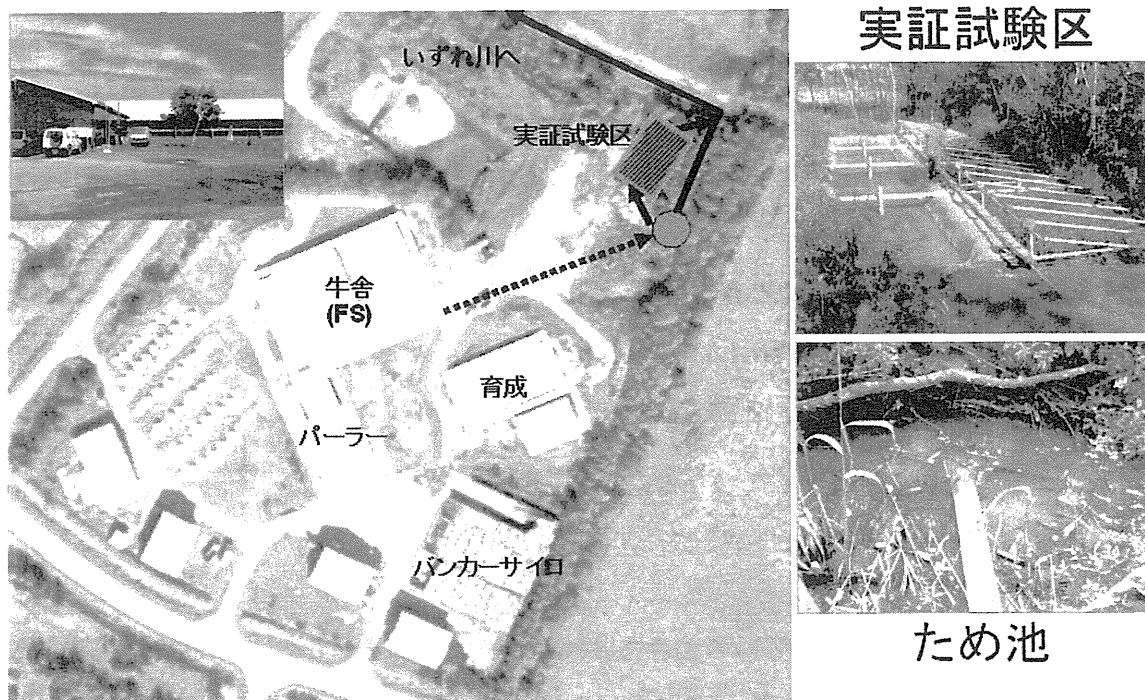


図2 浜中町就農者研修牧場の航空写真

(3) 植物の選定

定植させる植物の条件として、水に強いこと、手に入りやすいこと、そして、気象条件の厳しい浜中町においても生育が可能であることが挙げられる。本業務では、浜中町に多く自生しており、抽水植物であり、水質浄化効果が期待でき、緊縛作用が強く、多年生である「ヨシ」を選定した。ヨシは、北海道から沖縄まで幅広く分布している耐寒性に優れた植物である。イネ科で、地下茎や茎は水生昆虫や魚、鳥の生活や産卵の場となっている。種子だけでなく、地下茎でも繁殖し、地下茎によって増えた芽のことを分けつという。冬の間は種子や地下茎の状態休眠する。

(4) ヨシの定植方法

本業務では、「稈浸漬法(かんしんしほう)」を使用しヨシを定植させた。稈浸漬法は地上茎(稈)を地際から刈取り、水に浸漬する新しい方法である。

現在、ヨシを定植させる方法として次に示す3つの方法が主流となっている。ヨシ地下茎を含む土塊を掘り起こして植える方法、休眠芽が着生するヨシ地下茎を掘り起こして植える方法、育苗後のヨシを植える方法および種子から育苗を開始して現地に植える方法である(内田ら[9])。しかし、ヨシの地下茎を掘り起こす方法は、元の植物群落に与える影響が大きく、自然

に配慮した方法とは言えない。また、苗や種から育苗する方法は、ヨシの苗が1株400~500円と高額であり、種から育てた場合も養苗年数が4年と非常に長くなってしまいうため、一般的な農家で導入することは難しい。一方浸漬法では、根を残してヨシを刈取るため、環境に与えるダメージも少なく、雑草としてのヨシを利用することでコストもかからない。養苗年数も1年と短い。既存群落を保全しつつ、容易に生産でき、一般的な農家でも導入可能な方法であると言える。

浸漬法によるヨシの定植は現在までのところ、帯広までで確認されているが(内田ら[8])、小さい試験区で行われたものであり、実際の酪農現場においてこの方法を用いて定植させ、実際に排水を投入した事例はない。

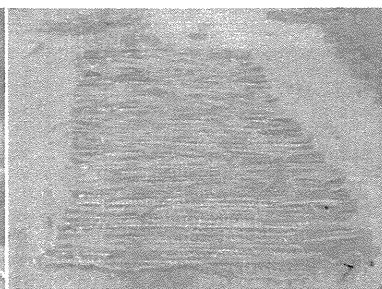
今回の定植には、ヤシの繊維が原材料であるパームグリットT-384,2(1m幅×25mで14,000円)という網目状のシート(以下、シート)を用いた。雑草として生えているヨシを電動草刈り機で刈取り、稈の太いものを1,600本選定した。シートは1×1.62mで20枚、1×2mの長さで2枚用意し、それぞれにヨシを編み込



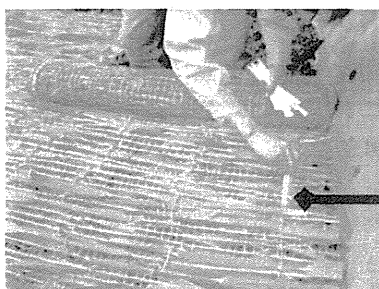
図3 ヨシの編み込み



① ヨシを刈る



② シートにヨシを編みこむ



③ シートを浸漬させる

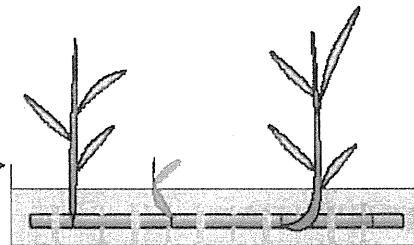


図2-4 浸漬法によるヨシの定植方法

んだ。この時、根元の部分がとなり合わないよう、互い違いに編み込むようにした(図3参照)。ヨシの側芽は編みこんだ稈の節の部分にあり、浸漬させることで伸長するので、節を均等に分布させ、ヨシが偏って生えてくるのを防ぐためである。

1×1.62mのシートに編みこんだヨシは約46本であった。シートからはみ出したヨシの先端をはさみで切り取り、シートを試験区に並べ、割り箸で土壤に固定し、浸漬させた(図4)。確実にヨシを定植させるため、排水は10月中旬より投入した。ヨシの編み込みに要する時間は、1人で作業した場合でも、1×1.62mのシート1枚で約30分であった。

(5) 生育調査方法

生育調査は2005年8月上旬から11月上旬まで、1ヶ月に2回行った。調査項目は、1㎡あたりに成長した側芽の数、草丈、分けつ数(地下茎によって増えた芽)の3項目とした。成長した側芽数にはばらつきがあったため、最も側芽の伸長が見られたところ、最も側芽の伸長が見られなかったところ、中間の3箇所を選び、テープで囲み目印をつけた(図5)。①区が中間であり、②区が成長した側芽の少ないところであり、③区が多いところである。1㎡あたりに成長した側芽の数は、目印の場所より分けつと思われる芽以外を数えた。草丈は各場所より3本を選び測定し、分けつ数は5株を選び測定した。

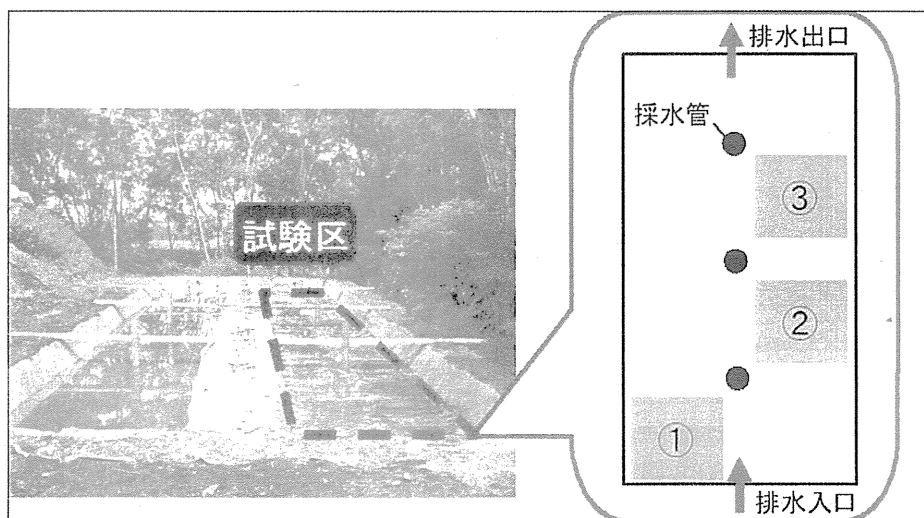


図5 実証試験区における生育調査区

(6) 水質、植物体、土壌分析項目と方法

分析項目と方法は下記のとおりである。

(水質分析項目)

水素イオン濃度(pH)	JIS K 0102 12
生物化学的酸素要求量(BOD)	JIS K 0102 17
化学的酸素要求量(COD)	JIS K 0102 21
浮遊物質(SS)	下水試験方法
全窒素(T-N)	JIS K 0102 45
全リン(T-P)	JIS K 0102 46

(植物体分析項目)

全窒素(T-N)	湿式分解－インドフェノール法
全リン(T-P)	湿式分解－トルオグ法

(土壌分析項目)

全窒素(T-N)	ケルダール分解(ガンニング変法)－インドフェノール法
全リン(T-P)	湿式分解－トルオグ法

(7) 対象とした排水、植物体、土壌

試験区への排水の投入は10月中旬であり、採水は11月下旬に行なった。採水場所は、排水の投入口付近、中央付近、排出口付近および4.5mおきに設置されている3本の採水管で、試験区と対照区それぞれから採水した。採水する際には柄杓を使い、排水以外のものが入らないように静かに掬った。

植物体の採取も排水と同時期の11月下旬に行なった。採取箇所は排水投入口付近、中央付近、排出口付近で、試験区と対照区それぞれから採取した。植物体とはヨシを根元からハサミで切り取ったものであり、地下茎と根は含まれていない。比較対象として、人工湿地の試験区付近に生育していたヨシと、研修牧場の敷地外に生育していたヨシを刈取り分析した。

土壌の採取は12月初旬に行なった。採取場所は、排水投入口付近、中央付近、排出口付近で、試験区と対照区それぞれから採取した。試験区の土壌には、ヨシの地下茎と根も含まれている。

3 結果

(1) 生育調査結果

1) 1㎡あたりに成長した側芽数

各区における1㎡あたりに成長した側芽数を図6に示した。10月上旬まで成長した側芽数の増加が見られ、最も側芽の伸長した区では、153本にまで増加した。各区における伸長した側芽数の平均は126本であった。編みこんだヨシ稈1本あたりに換算すると、1本から2.8本の幼苗が発生したことになる。

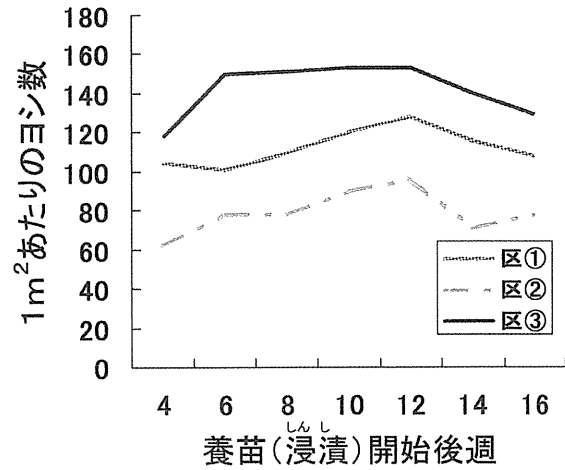
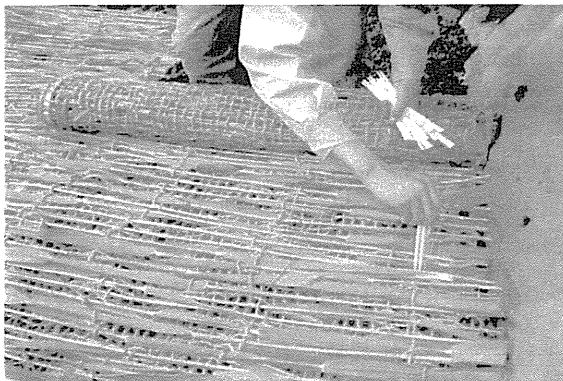


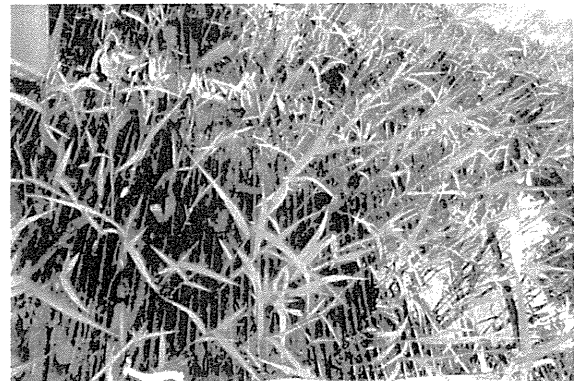
図6 各区における1㎡あたりのヨシ数

2) 草丈

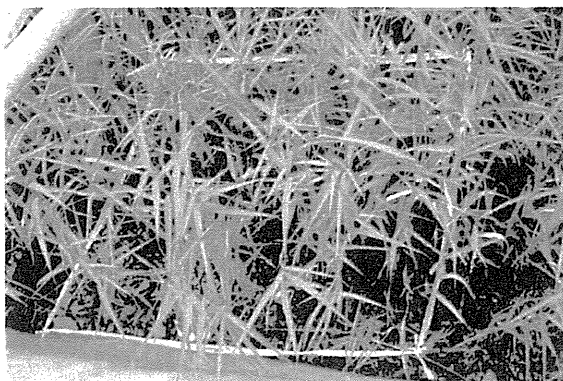
各区における草丈の推移を図7に示した。草丈は調査区による違いはあまりなかった。9月下旬まで草丈の伸長が見られ、最も伸長した個体で92cmにまで達した。ヨシは10月下旬より



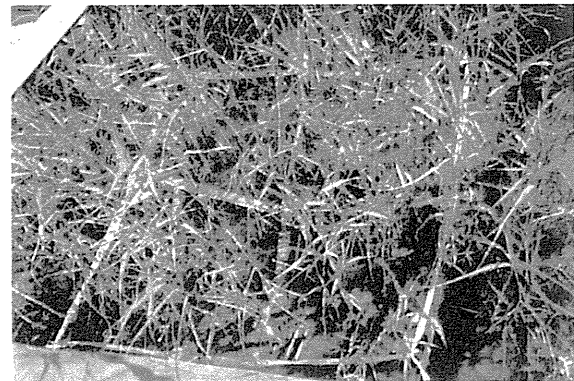
7月16日



8月10日



9月25日



10月24日

枯れ始め、11月上旬に調査を行ったときにはほとんどの個体が枯れていた。

3) 分けつ数

各区における幼苗1個体当たりの分けつ数を図8に示した。幼苗発生時に分けつは見られなかったが、最終的に2.2本の分けつが確認できた。4本から5本に分けつした個体もあり、生育も順調であった。なお、出穂は確認されなかった。

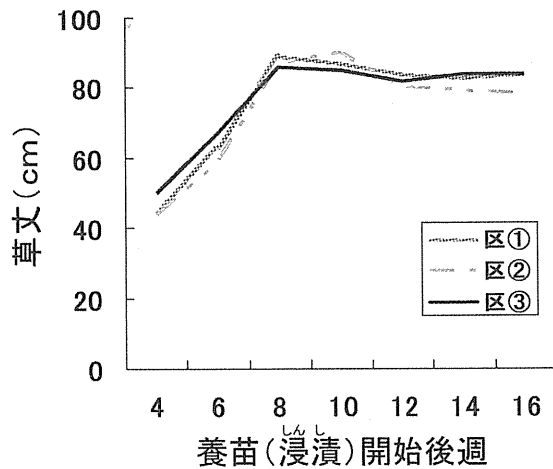


図7 各区における草丈

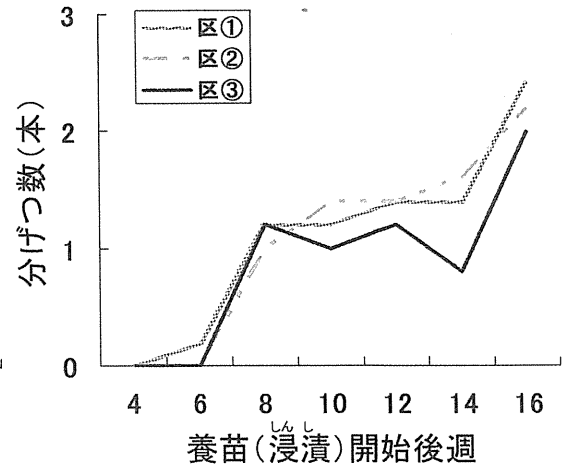


図8 各区における分けつ数

(2) 成分分析結果

採取箇所により数値に差が見られたのは、植物体および土壌のT-NとT-Pである。T-Nの値を図9(a),(b)に、T-Pの値を図10(a),(b)に示した。植物体のT-Nは、投入口付近で1,400mg/kg、中央で1,500mg/kgと高い値を示し、排出口付近で590mg/kgであった。比較対象とした試験区付近の植物体は、1,700mg/kgであり人工湿地内の植物体と同程度の値を示したが、研修

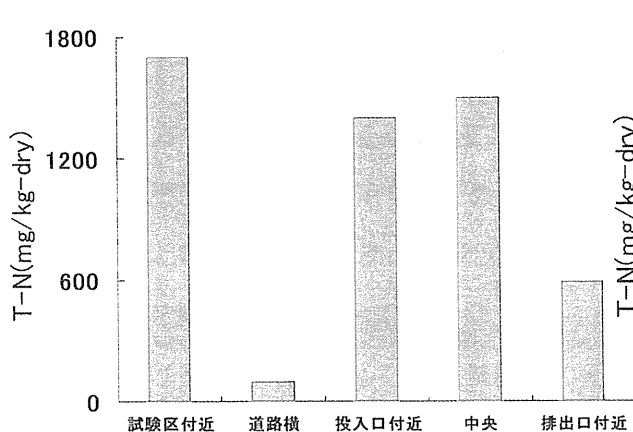


図9(a) 植物体のT-Nの推移

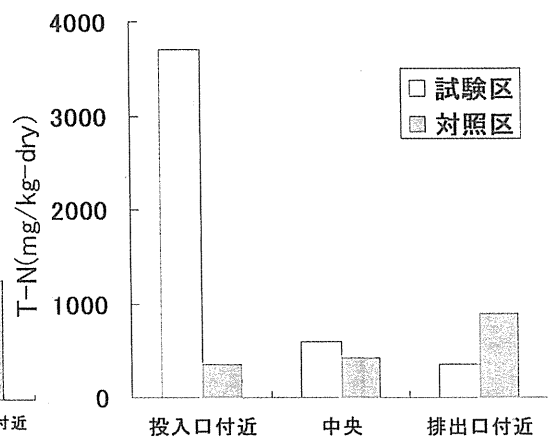


図9(b) 土壌のT-Nの推移

牧場の敷地外に成育していたヨシでは、100mg/kgと低い値であった。

試験区土壌でも投入口付近のT-Nが3,700mg/kgと非常に高かった。中央では590 mg/kg、排出口付近では350mg/kgと序々に下がった。一方、対照区土壌では投入口付近で350 mg/kg、中央で430 mg/kg、排出口付近で900 mg/kgと排出口に近づくにつれ、数値が低くなった。

次にT-Pであるが、植物体では投入口付近1,400mg/kg、中央610mg/kg、排出口付近380 mg/kgと排出口に近づくにつれ、T-Pが減っていった。T-Nと同じく、比較対象とした試験区付近の植物体は、2,400mg/kgであり人工湿地内の植物体と同程度の値を示したが、研修牧場の敷地外に成育していたヨシでは、38mg/kgと低い値であった。

試験区土壌では投入口付近36mg/kg、中央29mg/kg、排出口付近67mg/kgと差はほぼ見られず、対照区土壌でも投入口付近63mg/kg、中央82mg/kg、排出口付近75mg/kgと差はなかった。

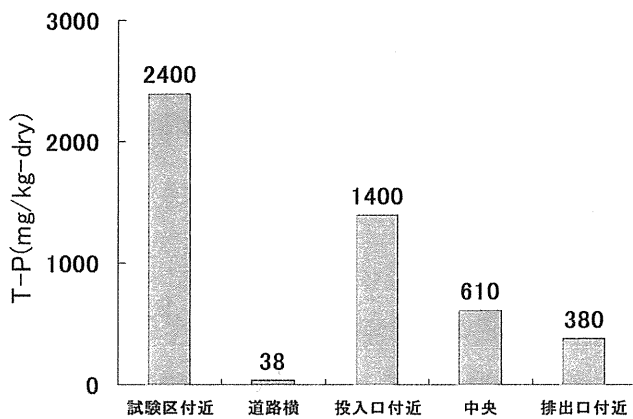


図2-10(a) 植物体のT-Pの推移

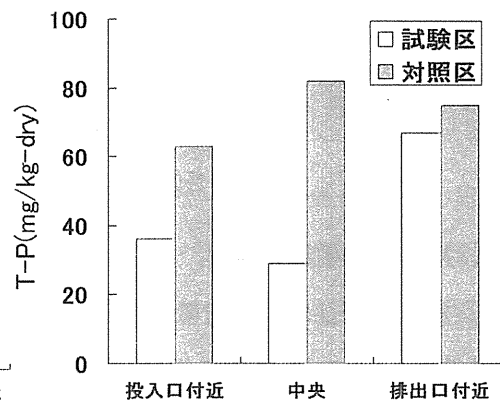


図2-10(b) 土壌のT-Pの推移

一方、表層および採水管から採水して分析した項目には、対照区より試験区の方が浄化されているというような、一定の傾向は認められなかった(表1~2)。水質基準値も満たしていた。

表1 表層水の分析結果一覧

分析項目	ため池	対照区			試験区		
		投入口	中央	排出口	投入口	中央	排出口
pH	6.5	7.0	7.1	7.1	6.8	6.7	6.8
BOD (mg/L)	180	67	33	25	140	120	120
COD (mg/L)	59	43	41	56	56	50	59
SS (mg/L)	6.0	3.0	3.0	2.5	5.0	7.0	1.5
T-N (mg/L)	1.5	0.42	0.07	5.1	7.3	7.2	0.57
T-P (mg/L)	2.2	6.4	3.8	3.3	8.7	9.1	9.4

表2 採水管から採取した水の分析結果一覧

分析項目	対照区			試験区		
	投入口	中央	排出口	投入口	中央	排出口
pH	6.6	6.7	6.5	6.5	6.6	6.8
BOD (mg/L)	43	41	56	56	50	59
COD (mg/L)	66	79	53	56	48	55
SS (mg/L)	1.5	3.0	2.0	2.0	1.0	1.0
T-N (mg/L)	1.8	2.5	4.7	4.2	0.65	9.2
T-P (mg/L)	0.68	0.57	0.86	1.5	0.80	0.80

4 考察

(1) 人工湿地の造成

実際の酪農現場で人工湿地を造成するうえで重要なことは、造成にかかるコストと労力である。コストに関して、浸漬法を用いた場合とヨシの苗を生育させた場合を比較すると、浸漬法を用いた場合は、シートのコストのみを考え、約2万円である。一方、苗から生育させた場合は、ヨシの苗を1株400円とし、1㎡あたりに成長した側芽数を本研究の生育調査結果より126本とすると、約181万円である。このことから、ヨシを苗から生育させた場合かなりのコストがかかることがわかる。

労力の面では、1×1.62mのシート1枚の編み込みに要する時間は30分であるので、人工湿地の造成には約11時間が必要である。また、ヨシを刈取る作業も考慮しなければならない。しかし、ヨシは多年草であるため、人工湿地を造成した翌年からは、ヨシの刈取りや編み込みの作業は必要なくなるため、労力的にも充分酪農現場で導入出来るものと言える。

(2) 生育調査

前述したように、浸漬法を用いたヨシの定植は帯広市までで確認されている(内田ら[9])。今回の研究ではより気象条件の厳しい浜中町で定植を試みた。浜中町での調査結果と帯広市での調査結果を比較したものを図11～12に示した。

1㎡あたりに成長した側芽数は、浜中町のほうが多くなったが、編みこんだヨシ程の数に差があったため、ヨシ程1本あたりに換算すると、浜中町では2.8本、帯広市では6.4本と、帯広市の半分以下であった(図11)。

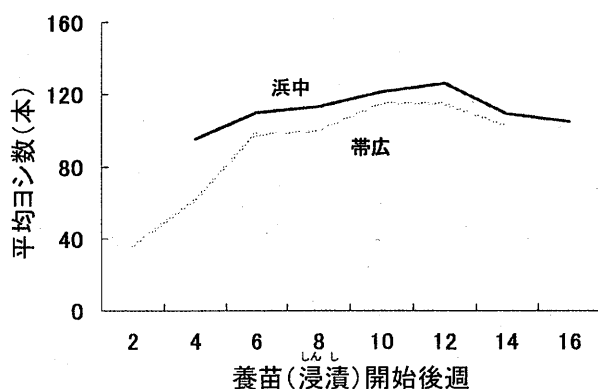


図11(a) 浜中と帯広における1㎡あたりのヨシの数の比較

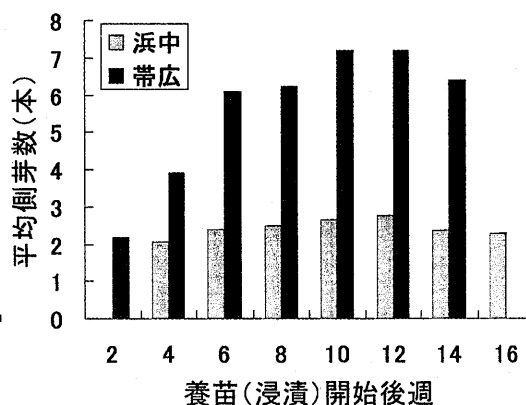


図11(b) 浜中と帯広におけるヨシ1本あたりの側芽数の比較

草丈についてはほぼ同じであった。分けつ数は帯広市と比べやや少なかった(図12)。

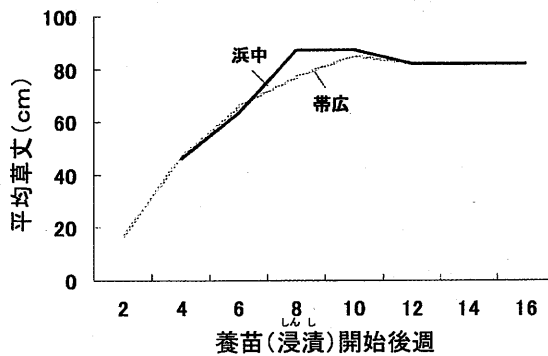


図12(a) 浜中と帯広における草丈の比較

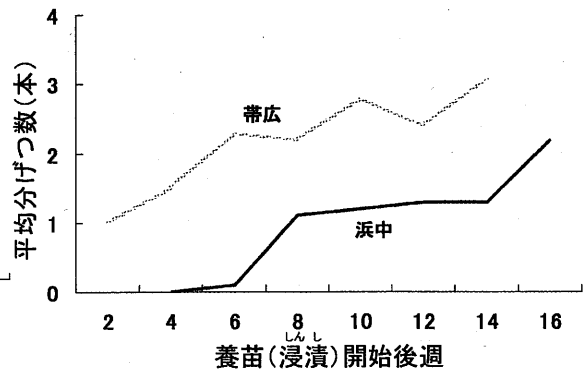


図12(b) 浜中と帯広における分けつ数の比較

以上のように、浜中町でも浸漬法によるヨシの定植に成功し、順調な生育が見られたが、帯広市と比べ生育状況は悪かった。考えられる原因としては、浜中町と帯広市の気象条件の違いである。帯広市では夏は比較的高温が続き、年間を通じて日照時間にも恵まれている。ヨシの養苗期間である、7月～11月の平均気温は13.4[°C]であり、平均日照時間は146.4時間であった。一方、浜中町は平均気温が12.1[°C]と冷涼な気候であり、日照時間も126.8時間と帯広を下まわっていた。特に7月～9月の平均日照時間は、道東沖で交錯する海流の影響で発生する海霧のため日差しがさえぎられる日が多く、帯広では131.8時間であったのに対して、浜中では105.4時間であり、大きな差がある[9]。このような気象条件の違いから、生育状況に差がたのではないかとと思われる。

稈浸漬法によるヨシの定植では、ヨシ稈の基部直径によって側芽の太さも決まるとされている。ヨシ稈の基部直径が細くなるほど、側芽の伸長する割合は少なくなる。また、稈の乾燥率にも側芽の伸長は影響を受け、乾燥率が高くなるほど伸長する側芽は減少する(内田ら[8])。明らかにそうとは言い切れないが、このような条件に差があったとも考えられる。

(3) 成分分析

人工湿地による水質浄化効果については、明確な結果を得ることはできなかった。しかし、比較対象である浜中町農協就農者研修牧場の外に生育していたヨシの植物体と人工湿地に定植した植物体のT-N、T-Pの差は顕著であったが、試験区付近の植物体と人工湿地内の植物体のT-N、T-Pでは余り差はなかった。実証試験区の製作に使用した土壌は、実証試験区付近の土壌と同じものである。このことから考えると、土壌の差によって植物体にも差が出ており、土壌

中の窒素やリンを植物体が吸収した可能性も考えられる。土壌においても植物体と同じく、排水の投入口付近のT-Nが高い傾向にあった。投入口付近では土壌や根の影響で窒素が多く吸着され、そのことに伴い、植物体の吸収量も高くなったとも考えられる。ただ、土壌の分析結果のみを見ると、T-Nでは対照区に比べ試験区の値が高い傾向にあったが、T-Pでは対照区の値が高い傾向にあり、植物体の根の吸着作用を立証することは出来ない。

しかし、北海道農業研究センター[1]によると、非積雪期間において、ヨシを定植させた人工湿地による水質浄化効果は、T-Nで49%、T-Pで62%の減少であった。したがってヨシによる水質浄化効果は期待できると言える。

今回の研究で水質浄化効果の明確な結果が得られなかった理由として、以下の4つの理由が考えられる。第1の理由は、排水を投入した時期が遅く、ヨシがすでに枯れていたことである。第2の理由は、研修牧場からの排水は、ミルクングパーラーから実証試験区までの距離が長く、ため池を1つ経由することで浄化されており、実証試験区に流入する時点ですでに水質基準を満たしていたことである。また第3の理由は、1回のみ分析であり、分析による誤差が生じた可能性があることである。そして第4の理由は、植物による吸収は養分の一時的な補捉であり、植物が枯れる前に刈取らなければならないが、今回の研究では植物を刈取っていないことである。

植物が刈取られた後の水質浄化は、土壌または土壌菌によって行われると報告されている。積雪期間に、T-Nで57%、T-Pで66%減少したという結果も得られている(北海道農業研究センター[2])。ヨシを刈取った後の人工湿地には、ヨシの根や地下茎が眠っており、有機物の吸着作用、緊縛作用、泥浄化を防止する作用も期待できる。

(4) 人工湿地の今後の展望

浸漬法によるヨシの定植は非常に容易であり、誰にでも手軽に行うことができる。また、ヨシの人工湿地を用いた酪農雑排水の浄化は、浜中町に多く自生しているヨシを使用し、地域の環境を保全する素晴らしい試みである。このようなことから、ヨシを用いた人工湿地の造成やヨシの刈取り作業を地域の小、中学生と共に行い、環境教育の一環として取り入れることを提案する。環境と酪農の共存の実現を長い目で見たとき、地域の人々1人1人の意識の改革はもちろんであるが、今後浜中町の酪農を担っていく子供達に、今の酪農の問題点を考えさせる機会をつくることが何より重要になってくる。地域に多く自生している植物を生かして、酪農雑排水を浄化する取り組みに参加することで、地域産業や地域の環境についての関心が高まり、更には

郷土愛を育てることにもつながっていくと思われる。

参考文献

- 1) 北海道農業研究センター(2004):北海道農業研究センター研究報告、人工湿地による富栄養化の浄化法の開発
- 2) 北海道農業研究センター(2003):北海道農業研究センター研究報告、表面流去型人工湿地による酪農雑排水の浄化
- 3) 金内紗良(2006):浜中町における酪農雑排水の全戸調査、2005年度酪農学園大学家畜管理理学研究室卒業論文集、酪農学園大学。
- 4) 釧路気象台ホームページ <http://sapporo-jma.go.jp/kr/kushiro/web/kus-top.htm>
- 5) 猫本健司(2005):パーラー排水等、畜産廃水の処理技術、北海道家畜管理研究会報、40:1-5.
- 6) 志賀一一(2004):家畜排せつ物の農地還元と硝酸塩汚染の問題、研究開発情報(平成15年)、畜産環境保全技術研究組合、5-21.
- 7) 高橋励起(2003):酪農パーラー排水の浄化、2003~2004年度酪農学園大学家畜管理理学研究室修士論文集、酪農学園大学。
- 8) 内田泰三(1998):ヨシ(*Phragmites australis*(Cav.)Trin.)の栄養繁殖法による幼苗生産の開発と水辺空間への導入に関する研究、1998連合農学研究論文、甲号158号<http://new711.atm.iwate-u.ac.jp/ronbun/1999/ut99a158.html>
- 9) 内田泰三、田崎冬記、丸山純孝(2001):ヨシ稈を用いた水域緑化に資する新手法の一提案、ランドスケープ研究、64:504-512.