研究論文

畜産廃水の土壌浸透システムにおける飼料作物の育成

ー土壌中のリン・栄養塩類の挙動および塩類集積に関する考察ー

櫻井 伸治*・藤川 陽子**・福井 正美**

濱崎 竜英***・菅原 正孝***

要 旨

土壌浸透法は低コストで使用できる廃水処理技術であり、排水の湿地処理として植物を生育させることによって栄養塩類除去の効果が相乗的に発揮されることができるとされている。しかし、生育される植物は農作物ではなく、抽水植物や樹木が一般的に使用されるため農家の積極的な参画が見込まれないこと、システムの維持には高頻度に刈り取りが必要になり、管理が複雑になることなどが問題点である。本研究では育てやすい飼料作物としてトールフェスク、シロツメクサを使った植物ポット試験を行い、畜産廃水を灌漑水として使用した時の土壌中の可給態リン酸、栄養塩類の蓄積傾向、さらに植物がこれらに与える影響を検討した。硝化により土壌 pH が低下した。これと同時に可給態リン酸の増加が見られた。ナトリウム集積、過剰なカリウムの蓄積の傾向が認められたものの、9 ヶ月の期間では植物生育に大きな問題にはならなかったが、植物体内のカリウム、マグネシウム等の検討が今後必要である。根の伸張によって「水みち」が形成され、土壌浸透システムの透水性維持が期待できた。

キーワード：土壌浸透法、飼料作物、可給態リン酸、ナトリウム集積、土壌診断

1. はじめに

土壌を浸透ろ材とした土壌浸透法による水質浄化は古くから欧米諸国で利用されており、日本においてもその利用価値の再評価がなされつつある¹⁾。土壌浸透法の中でも緩速浸透法および表面流下法では原水中に含まれる栄養塩類除去を目的として陸生植物を使った植生浄化が併用されている²⁾。植生浄化は環境に負荷がかからず、加えて植物の分解・吸収機能を利用することで環境ホルモン、重金属等による土壌汚染の修復にも大きな役割を果たす可能性を秘めている。従来、植生浄化に供される汚水は都市排水、生活排水が多く、畜産廃水の報告例はあまり多くない。

いわゆる植生浄化においてはガマ、ヨシ、イグサ等の湿地に適応した抽水植物やイトスギ、ヤナギ等の樹木が一般的に使用されている。一方、飼料作物など農

作物として市場価値のある植物の適用例は著者らの知る限り多くない³⁾。

非湛水状態において模擬畜産廃水で灌漑した飼料イネ（クサホナミ（*Oryza sativa* L.））を生育させた例では窒素除去に関し、対照系の全窒素（以下、TN）除去率が $24\% \pm 14\%$ であるのに対し、飼料イネを生育させた系では TN 除去率が $36\% \pm 11\%$ で有意な差があることが報告されている⁴⁾。しかし、植物の一回の刈り取りでは土壌浸透システムから除去される窒素の10%以下という報告²⁾も存在する。いずれにしても植生浄化を污水处理に適用する際には、植物の定期的な刈り取りが必要である。刈り取りを促すためには市場価値のある植物を植生として併用することが有効な方策と考えられる。

著者らは畜産廃水の高次処理について飼料作物を土壌浸透システムにおいて栽培する系の適用を構想して

* 京都大学大学院農学研究科 Shinji SAKURAI

** 京都大学原子炉実験所 Yoko FUJIKAWA, Masami FUKUI

*** 大阪産業大学大学院人間環境研究科 Tatsuhide HAMASAKI, Masataka SUGAHARA

2007年1月18日受付

2007年4月4日受理

いる。土壤浸透システムにおいてはリンの吸着除去や易分解性有機物の処理は比較的容易である。しかし条件によっては脱窒による窒素除去が困難であること、また土壤に捕捉された栄養塩類の再利用が行われない限り、土壤からの栄養塩の再放出が再び水圏を汚染する懸念があることが課題である。作物の灌漑水として畜産廃水を利用することで、植生浄化と土壤浸透処理を併用して上述の課題を解決できると考えられる。畜産廃水は植物にとっての栄養成分を豊富に含んでいる一方、これを土壤に適用することで塩類集積を考慮する必要もある。このため、単に水中の栄養塩類の除去という観点からだけではなく、植物を生育させるための土壤中交換性陽イオン濃度の管理と監視測定について考慮・検討する必要がある。

このような背景から本研究の目的は畜産廃水を土壤に通水した状況下において、土壤中の可給態リン酸ならびにカリウム、カルシウム、マグネシウム（以下、それぞれ K, Ca, Mg）および塩類集積の原因であるナトリウム (Na) と植物の相互作用を明確にすることである。そこで土壤浸透槽を模擬したポットを作成し、異なる 2 種類の土壤（赤玉土および黒ボク土）をポットに充填して、飼料作物であるトールフェスク、シロツメクサを播種した。これに畜産廃水を投与し、その後の植物生育経過を観察するとともに、土壤中の可給態リン酸、K 等の交換性陽イオンとポットからの流出水の水質を測定した。畜産廃水から投入される栄養成分と植物の吸収能力とのバランスおよび植物が浸透流出水の水質に及ぼす影響を明らかにすることで、畜産廃水を灌漑水として用いた土壤浸透施設は土壤栄養の観点から植物が生育可能であるか否か、また逆に植物が土壤の通水性にどのような影響を及ぼすかを検討した。

2. 実験方法

2.1 植物ポット試験

植物育成に用いた土壤は畜産廃水処理の土壤浸透システムで 1 年半にわたり使用された広島県産の黒ボク土と、土壤浸透システムで使用する予定の山梨県産赤玉土とした。植物としてはイネ科のトールフェスク (*Festuca arundinacea*) およびマメ科のシロツメクサ (*Trifolium repens*) を用いた。両者は共に多年性の家畜の飼

料作物であり、比較的周囲環境に適応する能力があるため育てやすい。ポットに投入した灌漑水は芦田湖水浄化施設（広島県世羅郡世羅町）に流入する畜産廃水を一定期間ごとに大量に採水したものとした。畜産廃水の性状は採水の都度測定した（表 1）。採取時期によって現地の畜産廃水の水質には大きな変動があったが、これは畜産場の運営や家畜の成長によるもので現場の実態を反映していると考えられたことから特に水質の調整は行わずにそのまま使用した。

土壤診断分析用に縦 13cm、横 32cm、高さ 65cm のアクリル製ポット（以下、大型ポット）を用意し黒ボク土または赤玉土を充填、シロツメクサまたはトールフェスクを直播種した。対照として、各土壤に何も植えていないポットも用意し、計 6 つのポットを用意した。流出水の水質分析用には縦 6 cm、横 32cm、高さ 65cm のアクリル製ポット（以下、小型ポット）を用意した。実験室のスペースの都合上小型ポットは赤玉土のみを充填したポットを 2 つ用意し、一方はシロツメクサを植え、他方は何も植えずに対照試験とした。

大型ポット、小型ポット共に排水性を良くするために軽石を底部に敷き詰めた。大型ポットには、当初各ポットに通水速度が 1.2cm/day になるように畜産廃水を投入し、生育が安定した時期に 0.48cm/day に変更した。小型ポットへの畜産廃水投入は底部からの流出量を適量にするために 2.6cm/day、3.9cm/day、1.3cm/day と段階的に変化させた。両ポットは室温 25℃、相対湿度 70% に保った恒温恒湿室内に設置した。光に関しては日光と類似したスペクトルを放射する蛍光灯（COLOR LIGHT 600 ニッソー）を使用し、午前 6 時から午後 6 時までの 12 時間、タイマーを用いて植物に与えた。実験期間は約 9 ヶ月であった。

2.2 土壤診断分析

大型ポットでは実験開始から所定の日数に上から 0 cm、5 cm、25cm の土壤を採取し、2 mm アンダーの風乾土について可給態リン酸、pH、電気伝導度（以下、

表 1 流入水としての畜産廃水の性状

畜産廃水	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	全窒素	全リン	色 度	COD-Cr
0～2 週	0.7	0.0	6.1	10.9	1.3	9	18
2～8 週	4.8	0.0	28.7	35.1	9.8	123	68
8～22 週	—	1.1	28.8	41.0	1.9	44	42
22～28 週	4.1	58.5	17.7	121.9	10.1	87	—
28～38 週	—	—	—	—	13.6	265	147

・単位：mg/ℓ、ただし色度は除く

・—：未測定、ND：検出限界以下（0.2mg NO₂-N/ℓ 以下）

EC), 交換性陽イオン(K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} および Na^+)を測定した。可給態リン酸はトルオーグ法にて測定し、乾土100 gあたりの P_2O_5 量(mg)で表した。土壌のpH, ECは固液比1:5の水懸濁液で測定した。交換性陽イオンは5 gの風乾土を100mlの1 M酢酸アンモニウム溶液で一時間振とうすることで抽出される K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} および Na^+ とし、土壌100 gあたりの K_2O , CaO , MgO および Na_2O 量(mg)に換算して表した。測定はNa, Kは原子吸光分析法で、Ca, MgはICP発光分光分析法で行った。また大型ポットでは植物体の草丈も測定した。

2.3 流出水分析

径孔 $0.45\mu m$ のろ紙(Millipore)でろ過した流出水および畜産廃水中の全リン(以下, TP), TN, 色度, アンモニア態窒素(以下, NH_4-N), 硝酸態窒素(以下, NO_3-N), 亜硝酸態窒素(以下, NO_2-N)を測定した。ポットの除去効果は流出水の濃度に対する流出水の濃度の相対濃度で表した。色度は390nm吸光光度法, TNは下水試験法⁵⁾により測定した。 NO_3-N , NO_2-N はイオンクロマトグラフ(IC7000, 横河アナリティカ

ルシステムズ)にて測定した。 NH_4-N は蒸留法にて測定した。これに加えて畜産廃水(8~22週, 28~38週の試料のみ)中のK, Ca, MgおよびNaを原子吸光法およびICP発光分光法によって測定した。

3. 結果と考察

3.1 土壌中の可給態リン酸への植物の影響

深さ, 土壌および植物種別の可給態リン酸含有量を表2に, 土壌pHの平均値の経時変化を表3に示す。赤玉土, 黒ボク土の試験開始前の可給態リン酸含有量はそれぞれ検出限界(1.8mg/100 g乾土)以下, 18.3mg P_2O_5 /100 g乾土であった。

表2から明らかなように赤玉土・黒ボク土共に可給態リン酸含有量が表層部に近いほど高くなっている。一般に畜産廃水中のリンは土壌に投与されるとまず土壌表層部で吸着され, 土壌への吸脱着を繰り返しながら浸透水とともに徐々に下方移行すると言われていた。本研究で土壌中の可給態リン酸は元来畜産廃水に含まれていたものが大部分と考えられ, 可給態リンの土壌深さ方向分布にもこのようなリンの挙動が反映

表2 深さ, 土壌および植物種別の可給態リン酸の経時変化

	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約6ヵ月	約9ヵ月	試験前	約6ヵ月	約9ヵ月
植物なし	0		4.8	37.7		39.4	72.1
	5	0	ND	2.3	18.3	23.3	70.4
	25		ND	2.8		24.8	56.7
トールフェスク	0		6.0	9.0		29.2	57.7
	5	0	ND	ND	18.3	21.3	43.6
	25		ND	ND		11.8	30.4
シロツメクサ	0		3.2	6.1		22.4	82.0
	5	0	ND	ND	18.3	13.5	20.8
	25		ND	ND		14.6	28.7

・単位: mg P_2O_5 /100 g 乾土

・-: 未測定, ND: 検出限界以下(1.8mg/100 g 乾土以下)

表3 深さ, 土壌および植物種別の土壌pHの経時変化

	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約6ヵ月	約9ヵ月	試験前	約6ヵ月	約9ヵ月
植物なし	0		5.5	5.0		5.6	4.9
	5	7.3	6.7	6.1	7.0	6.6	5.5
	25		6.8	6.5		6.8	6.4
トールフェスク	0		5.9	4.8		5.2	4.7
	5	7.3	6.6	6.4	7.0	6.7	5.9
	25		6.7	6.5		6.7	6.3
シロツメクサ	0		5.3	5.5		5.8	5.0
	5	7.3	6.6	6.3	7.0	6.6	6.2
	25		6.8	6.3		6.8	6.4

していると考えられる。

また赤玉土・黒ボク土共に植物がある場合は植物がない場合と比較して可給態リン酸は土壌全層に渡って低く、植物によるリンの摂取が起こっているためと推定された。

赤玉土と黒ボク土では、植物の有無にかかわらず可給態リン酸の量や分布に大きな差がある。特に赤玉土の方が黒ボク土に比べて表層部の可給態リンが下層部に比して著しく高い分布となっている。一方黒ボク土は、元来18.3mg P_2O_5 /100 g 乾土程度の可給態リン酸を含んでいるが、畜産廃水投入後全層に渡り可給態リン酸が増加し下層での可給態リン酸の増加が赤玉土に比べて著しい。これは赤玉土とリンの結合は黒ボク土とリンの結合に比べてより非可逆的（リンの脱離性が小さい）なためと考えられる。なお高 pH では Ca はリン酸と結合して難溶性の化合物を形成するため、植物に摂取されにくい形態になる^{6, 7)}。しかし本試験の土壌は pH が低いので Ca が可溶化され、Ca による可給態リン酸の不溶化は生じにくいと考えられた。

牧草土壌では可給態リン酸が10mg P_2O_5 /100 g 乾土以下が不足、10～50mg P_2O_5 /100 g 乾土の範囲で適正量である⁸⁾。黒ボク土では飼料作物育成に十分な量の可給態リン酸が全層に行き渡っていた。一方、赤玉土では可給態リン酸が全層に行き渡らず、地表部以外ではリン不足の状態と言える。

本研究では両土壌において表層で土壌 pH がアンモニア硝化（3.3で述べる）に起因して低下する傾向が見られ、これによって土壌中の鉄やアルミニウム鉱物と結合したリンが可溶化されることも考えられる。なお植物種による pH の有意な差は見られなかったため、この低下は植物に関係のない物理化学的過程の影響と考えられる。pH と可給態リン酸の関係に関しては明確な関係は解明されていない。植物根からの有機酸および H^+ の放出によってリン酸が可溶化されるという報告⁹⁾がある。その一方で pH が5から7.0へ上がることでリンの脱着が増大するという報告¹⁰⁾や pH が5.2～5.5でリンの土壌の吸着性が最大になるという類似した報告¹¹⁾がある。今後さらに検討する。

3.2 土壌の交換性陽イオンへの植物の影響

畜産廃水（8～22週、28～38週の試料のみ）中の各主要陽イオンの濃度を表4にまとめた。表4から畜産廃水中の各主要陽イオン濃度は高い値を示しており、肥料としての役割を果たしているが、塩害の要因とな

表4 畜産廃水中の主要陽イオン成分

畜産廃水	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
8～22週	38.9	131.2	20.4	4.8
28～38週	121.0	496.8	49.0	10.4

・単位：mg/ℓ

る Na⁺ モル濃度も全主要陽イオンモル濃度の約30%を占めており豊富にあることが判った。また採取時期により主要陽イオン濃度が、数倍程度異なっていた。都市排水におけるカリウム濃度は通常10～15mg/ℓで、これを灌漑水として用いた場合カリウム不足が懸念される²⁾が、畜産廃水ではこれを遙かに超過する濃度で含まれていた。

実験開始4ヵ月、9ヵ月後の土壌中の交換性陽イオンの深さによる分布を植物種および土壌種別ごとに表5に示す。各陽イオン成分は土壌中でそれぞれ特有の挙動を示すことが判った。Na, K は類似の挙動を示しており、全体的に浅層部に留まる傾向にある。これに対して両土壌で Ca, Mg は下層部に移行する傾向にあることが判った。

本研究の実験系では土壌水分は浸潤による下方移行、毛管上昇、浸潤停止による水分再配分、土壌表面での蒸発および経根吸収による水の上方移行などの影響¹²⁾を受け、非定常な条件下にあると考えられる。

一方、水中に溶解しているイオンは土壌への吸着により、水に対して遅れ度（遅延係数）をもって移動する。Na, K の1価アルカリ金属イオンは、一般に Ca, Mg 等のアルカリ土類金属イオンに比べて土壌への吸着性が低いことが知られており、水分移動に対する遅れ度（遅延係数）も低い。本実験系では Na, K は一旦灌漑水とともに浸潤した後、水分の上方移行に伴って表層に向けて再移動し、一方 Ca, Mg は浸潤後の上方移行の影響を受けにくく、毎日の畜産廃水投入に伴う下方移動が卓越していた可能性が考えられる。なおこの傾向は飯塚ら¹³⁾の結果と一致していた。

ところで多くの作物で K の摂取速度は20～350kg/ha 年²⁾である。一方畜産廃水の K 濃度を表4から130～500mg/ℓと仮定し、実験条件から通水速度が0.48 cm/dayであることを考慮すると本研究の条件で年間を通して灌漑を行った場合、K 投入量は2300～8800 kg/ha 年と概算される。このことから植物の摂取速度を卓越した過剰の K が畜産廃水からポットに投入されていることが判った。

植物を植えていないポットと植物を植えているポッ

表5 深さ、土壌および植物種別の交換性陽イオンの深さによる分布

Na	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約4ヵ月	約9ヵ月	試験前	約4ヵ月	約9ヵ月
植物なし	5		55.8	85.9		21.5	54.9
	25	0.8	21.3	26.4	11.0	14.6	18.7
トールフェスク	5		39.1	111.1		21.6	40.5
	25	0.8	18.3	21.8	11.0	14.2	24.6
シロツメクサ	5		37.1	84.4		16.4	25.9
	25	0.8	14.0	21.6	11.0	18.6	22.7

K	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約4ヵ月	約9ヵ月	試験前	約4ヵ月	約9ヵ月
植物なし	5		74.7	268.5		144.7	338.5
	25	41.9	44.6	53.7	93.0	133.6	162.9
トールフェスク	5		51.2	107.1		144.5	269.0
	25	41.9	45.2	59.9	93.0	124.2	174.9
シロツメクサ	5		71.7	204.4		128.8	204.3
	25	41.9	41.6	162.3	93.0	128.6	162.3

Ca	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約4ヵ月	約9ヵ月	試験前	約4ヵ月	約9ヵ月
植物なし	5		467.8	453.5		435.3	579.7
	25	440.8	471.4	544.2	417.7	558.4	675.1
トールフェスク	5		441.9	513.6		429.8	511.6
	25	440.8	455.3	497.5	417.7	453.4	587.3
シロツメクサ	5		362.2	402.0		402.2	566.9
	25	440.8	281.2	471.1	417.7	478.7	576.9

Mg	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約4ヵ月	約9ヵ月	試験前	約4ヵ月	約9ヵ月
植物なし	5		70.3	86.7		75.5	79.6
	25	67.5	77.5	111.7	78.2	105.0	150.4
トールフェスク	5		72.0	103.2		85.8	87.4
	25	67.5	77.8	109.5	78.2	98.0	147.2
シロツメクサ	5		64.4	90.1		92.7	146.9
	25	67.5	63.2	115.5	78.2	100.4	144.5

・単位：mg Na₂O, K₂O, CaO, MgO mg/100 g 乾土

トを比較すると、Kの含有量が、同じ深さでは植物がある方が両植物で減少しているのが見られた。これは植物による摂取と考えられる。しかし投入量がKの摂取速度を上回っていたため植物のあるポットでも交換性Kの濃度は全ての深さで時間とともに増加していた。

3.3 土壌へのナトリウム集積

過剰のNaは土壌の団粒構造を崩壊して透水性を悪化させるだけでなく、植物にとっても吸水・生育障害を招く。ここではナトリウム集積を中心に検討した。

Tejada et al.¹⁴⁾は土壌の陽イオン交換容量（以下、CEC）に対する交換性Naの割合（Exchangeable

Sodium Percentage）（以下、ESP）を用いてナトリウム集積の指標としている。

$$ESP = 100 [Na^+] / CEC \quad (1)$$

本研究では交換性主要陽イオンに対する交換性Naの割合（以下、Na率（単位、%））を用いた。Na率は次式を用いて算出した。

$$Na \text{ 率} = 100 [Na^+] / ([Na^+] + [K^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]) \quad (2)$$

ここで [] は交換性陽イオン濃度（cmol/kg乾土）である。ここでNa, K, Ca, Mg以外で本試験の土

壤中に存在する陽イオンは NH_4^+ であること、土壌は畜産廃水の投与で塩基飽和状態であることが推定される。そのため、本土壌の陽イオン交換容量は次式で近似可能になる。

$$\text{CEC} = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{NH}_4^+] + [\text{H}^+] \quad (3)$$

CEC は $[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$ より必ず大きいので ESP と Na 率の間には常に次の関係が成り立つ。

$$\text{ESP} < \text{Na 率} \quad (4)$$

式(4)より Na 率は ESP 値より常に大きな値となる。例えばナトリウム集積の目安は ESP 値15以上¹⁵⁾であるが、Na 率が15未満であれば ESP 値も必ず15未満になることが式(3)より保証されるため、ここではナトリウム集積土壌の目安を Na 率15%とする。Na 率の経時変化を表6に示した。両土壌で Na 率が時間とともに増加傾向にあるが、赤玉土の方が黒ボク土に比べて増加率が高い。同時に赤玉土は Na 率も高く、トールフェスクの深さ 5 cmにおいて15を超過する値が観測され、ナトリウム集積土壌に変化した可能性が高い。また赤玉土では黒ボク土より Na は浅層部に停留する傾向があることが判った。一方、黒ボク土はナトリウム集積土壌になっていない。

一般に黒ボク土は腐植物質が多量に含まれており CEC も高い値を示す¹⁶⁾。ただし黒ボク土に含まれている腐植成分の Na, K の吸着選択性が非常に小さいことが知られている¹⁷⁾。赤玉土は腐植成分が少ないが CEC は大きい¹⁸⁾。赤玉土は赤土に分類され¹⁸⁾、メタハロイサイト、Al-バーミキュライトを主成分とした粘土鉱物を多く含んでいるため¹⁹⁾、Na, K の吸着選択性は黒ボク土に比べて大きい。その結果赤玉土には多量の Na, K が浅層部に吸着したのと考えられる。

土壌の EC については両土壌ともに初期において

EC は 0 に近かったが、全ポットが畜産廃水の灌漑とともに EC が増加した。ただしほとんどの深さ、土壌種で EC の値は作物生育の観点から塩類集積土壌と定義とされる $4 \text{ mS/cm}^{14)}$ 以下であった。シロツメクサ、赤玉土表層部の 9 ヶ月灌漑のみが土壌 EC 9.3 mS/cm となり塩類集積と判断された。これは赤玉土への Na, K の吸着の大きいことや高い CEC によるものと考えられる。

3.4 シロツメクサが流出水の水質へ与える影響

小型ポット試験の流入水と流出水で、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、色度、TN、TP 各々の比をとり、ポットへの積算流入量の変化に伴う推移を図1に示した。またこれら水質項目の流出水中の測定値を流入水の交換期間ごとに平均化して表7に示した。なお、ポットからの流出水は土壌のみのポットでは積算流入量が20000ml(実験開始約2ヵ月)、シロツメクサのポットでは40000ml(実験開始約4ヵ月)以降からしか得られていないため、それ以前の値は表示していない。また色度のみ積算流入量が90000ml程度になるまで測定し、その他の項目は70000mlまでの測定とした。TP は流出水中でほぼ検出下限値 (0.08 mg/l) 以下であったので図には示さない。

図1(a)から流入水と流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を比較すると、流出水の方が大きく増加している。また $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度はほぼ0であったことから、土壌中に元来生息または畜産廃水中に存在していた微生物によって、畜産廃水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、易分解性有機態窒素が、迅速に硝化作用を受けて $\text{NO}_3\text{-N}$ になったと考えられる。この $\text{NO}_3\text{-N}$ の大幅な増加の影響を受けて、土壌のpHが低下した(表3)ものと考えられる。また、2つの小型ポットは流出量の調整によって流入量に若干の違いがあるため、積算流入量も同じでないが、両者を比較すると積算流入量が40000~50000ml付近まで $\text{NO}_3\text{-N}$ の相対濃度は2~3に停滞しているが植物を植えたポットで相対濃度が急激に上がっている。相対

表6 深さ、土壌および植物種別の Na 率の経時変化

	深さ (cm)	赤玉土			黒ボク土		
		試験前	約4ヵ月	約9ヵ月	試験前	約4ヵ月	約9ヵ月
植物なし	5	0.6	13.3	14.8	3.0	5.2	8.3
	25		5.7	5.9		3.0	3.0
トールフェスク	5	0.6	10.5	20.3	3.0	5.1	7.1
	25		5.1	5.2		3.3	4.2
シロツメクサ	5	0.6	11.1	16.5	3.0	4.1	4.8
	25		5.7	4.5		4.2	4.2

・単位：%

図1 畜産廃水に対する小型ポット（赤玉土）流出水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 、色度、TNの流入水中濃度との相対値
 ・(a)： $\text{NO}_3\text{-N}$ 、(b)：色度、(c)：TN、ただし試験開始積算流入量20000mlまでは流出水を採水できなかった

表7 各流入水に対する流出水の水質測定平均値

		0～ 2週	2～ 8週	8～ 22週	22～ 28週	28～ 38週
$\text{NO}_3\text{-N}$	シロツメクサ	—	—	69.1	93.2	—
	植物なし	—	—	70.1	64.3	—
TN	シロツメクサ	—	—	85.1	109.8	138.8
	植物なし	—	—	65.9	73.7	129.7
色 度	シロツメクサ	—	—	5.0	7.2	32.5
	植物なし	—	3.4	3.2	2.3	2.5
TP	シロツメクサ	—	—	ND	ND	0.2
	植物なし	—	ND	ND	ND	ND

・単位：mg/ℓ、ただし色度は除く

・—：未測定，ND：検出限界以下（0.08mg/ℓ以下）

色度でも同様にシロツメクサを生育させたポットにおいて積算流出量が増加するにつれて色度の大幅な増加が見られた。また、ポットからの流出水のTPは実験期間中、シロツメクサの根がポットの下端まで伸張するまで検出限界以下（0.08mg/ℓ以下）であった。すなわち流出水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 、色度およびTPの増加には主として22週～28週（積算流入量54000～70000ml（シロ

ツメクサあり）、44000～54000ml（植物なし）の流入水の $\text{NO}_3\text{-N}$ の大幅な増加の他に、根の拡張による水みちの形成などの植物の影響が考えられる。ただし相対色度値は増加があっても0.3未満であり、これは色度が主として土壌による生物物理化学的吸着作用により除去されているためと考えられる。TNの相対濃度は植物の有無にかかわらず、流入水の濃度変動のため多少の変動はあるものの1前後で一定であった。本研究では先述した周ら⁴⁾の研究とは違って、シロツメクサの摂取による窒素除去は見られなかった。

3.5 植物ポット試験における植物生育状況

大型ポットにおけるトールフェスク、シロツメクサの草丈を図2で示す。

トールフェスクでは、総じて開始200日間あたりまでは両土壌とも同程度の成長度合であるが黒ボク土の方で若干草丈が低かった。200日以降黒ボク土で急激な成長が見られ、最終的に黒ボク土のトールフェスクの草丈が長かった。しかし茂り方等の全体的な生育状況は、可給態リン酸について貧栄養で塩類集積傾向の強い赤玉土の方が良かった。トールフェスクは耐塩性（土壌EC＝6～10mS/cm²⁰⁾）があり、本研究では土壌別の生育状況の差は塩類集積が直接的な原因とは考えにくい。また土壌pHも両土壌の表層部で5.0を切っており、牧草土壌としてはやや低い値（適正範囲：pH＝5.5～6.5⁸⁾）であったが、深部では適正範囲内であった。本実験では直播種を行ったため、種子の個体差が生じた可

能性も考えられる。

シロツメクサでは、草丈自体は開始200日間あたりまでは両土壌で同程度の伸び率である。それ以降は黒ボク土で生育させた方が赤玉土で生育させたものより生長が良かった。全体的な生育状況では圧倒的に黒ボク土の方が良かった。しかし両土壌で開花はほとんど見られなかった。植物には日長を感じる機能を備えて

図2 トールフェスク, シロツメクサの草丈

いるが12時間の一定の照射時間によってシロツメクサの周光性機能に変調が現れたものと考えられる²¹⁾。人工照明の照度が4000~7000lx程度で、野外では曇りの状態であり光量自体も低かったことが考えられる。

先述したように牧草土壌では可給態リン酸が10 mg P_2O_5 /100 g 乾土以下が不足、10~50 mg P_2O_5 /100 g 乾土の範囲で適正量である⁸⁾。本研究で対象とした土壌は赤玉土では初期の状態では可給態リン酸不足の状態であったが、畜産廃水の投入によって適正值付近まで増加していることが判った。その他の植物の主要必須成分である土壌中の交換性 K_2O 、 CaO 、 MgO の適正範囲は植物種、土壌の種類および CEC の大小にもよるが、それぞれ15~40 mg/100 g 乾土、100~550 mg/100 g 乾土、20~60 mg/100 g 乾土⁸⁾である。Ca はほぼ適正值内か若干過剰であった。一方 K、Mg は過剰であった。牧草土壌の改良目標から見ると土壌 pH (適正範囲: pH=5.5~6.5)、可給態リン酸 (適正範囲: 10~50 mg P_2O_5 /100 g 乾土)、K 飽和度 (適正範囲: 2~5%)、Ca 飽和度 (適正範囲: 40~60%)、Mg 飽和度 (適正範囲: 5~20%) が適正值⁸⁾である。本研究では表5の結果を基に K 飽和度を近似的に求めると約30%程度まで上昇していた。K の過剰症は生じにくいとされているが、多量の K は Mg の吸収を阻害するため、Mg が不足した飼料作物が生育してしまい、これを摂取する家畜に Mg 欠乏症等の影響を与える可能性もある⁸⁾。今後、植物体内の K、Ca および Mg の含有量の検討が必要である。

4. 結 論

本研究では畜産廃水で灌漑しても、飼料作物は生産できることが判った。可給態リン酸は畜産廃水由来のもので、黒ボク土ではアンモニア硝化に起因する pH

低下によるリンの可溶化・畜産廃水由来の可給態リン酸の増加および植物摂取によるリンの流出抑制効果が示された。赤玉土では黒ボク土と比べてリン酸の土壌への吸着がより非可逆的で、下層まで可給態リン酸が行き渡らず、地表部以外では栄養面においてはリン不足であった。また流出水の水質は赤玉土のみを使用した小型ポット実験で、色度、リンに関しては流入水に比べて改善していたが、色度、リンの除去は主に土壌への吸着のためと考えられた。畜産廃水中の窒素は植物による吸収が予想されたが、畜産廃水の窒素濃度が高かったため、植物による窒素の摂取の影響は認められなかったと考えられる。総じて流出水の水質改善に植物の有無による差異は示されなかった。

生長に伴う根の伸張により水みちが形成され、植物を植えることで色度が增加する場合のあることが示された。しかし逆に水みちの形成は透水性を維持し、目詰まりを生じさせにくくするため、システムの寿命を延長させる効果がある。

土壌中の K、Ca、Mg および Na は畜産廃水の性質上高濃度に含まれており、ナトリウム集積や塩類集積の危険性も予測された。土壌深さごとの交換性陽イオン分布を調査した結果、Na、K は表層近くに集積し、Ca、Mg は深さによらず、比較的均一に分布した。植物生育状況や土壌診断結果から植物にとって致命的なナトリウム集積や塩類集積は生じていないと判断された。高頻度の積極的な刈り取りなどを行う等の年単位の管理で飼料作物栽培と土壌浸透システムの併用が可能であると考えられた。

ただし全体に K が過剰に投与されているため、この植物を摂取する家畜に Mg 不足が起こる可能性が考えられる。今後は植物体内の K、Ca、Mg 含有量を検討する必要がある。またリン、窒素の土壌中含有量の

変化を明確にする必要がある。

謝辞：本研究にあたりまして、現地から畜産廃水を送って頂いたエヌエス環境㈱の梶山様、実験を手伝って頂いた原田さん、弘瀬さん、水やりを手伝って頂いた大阪産業大学の関係者に感謝の意を表し、ここに記します。

文 献

- 1) 藤川陽子 他；土壌浸透水浄化システムの再評価・再構築，環境衛生工学研究，**17**，(3)，35-40，2003.
- 2) Sherwood C. Reed, Ronald W. Crites, E. Joe Middlebrooks 著，石崎勝義，楠田哲也監訳，(財)ダム水源環境整備センター企画；自然システムを利用した水質浄化，技報堂出版，185，287-322，2001.
- 3) Humenik F.J., Szogi A.A., Hunt P.G., Broome S., Rice M.； Wastewater utilization, ASIAN-AUSTRALASIAN JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE, **12**, (4), 629-632, 1999.
- 4) 周勝，高田誠，中井智司，細見正明；飼料イネを用いた窒素除去とバイオマス生産，水環境学会誌，**28**，(11)，697-703，2005.
- 5) 建設省（現国土交通省）都市局下水道部・厚生省（現厚生労働省）生活衛生局水道環境部監修；下水試験法上巻，(財)日本下水道協会，184-188，199-200，1997.
- 6) E.C. Zamuner, L.I. Picone, H.E. Echeverria； Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage, Soil & Tillage Research, **89**, 70-77, 2006.
- 7) Yuncai Hu and Urs Schmidhalter； Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants, J. Plant Nutr. Soil Sci., **168**, 541-549, 2005.
- 8) 藤原俊六郎，安西徹郎，加藤哲郎共著；土壌診断の方法と活用，農文協，100-103，240，1996.
- 9) 足立泰久，岩田進午編著；土のコロイド現象，学会出版センター，423-425，2003.
- 10) Sato S.； Comerford C.B.； Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid Brazilian ultisol, REVISTA BRASILEIRA DE CIENCIA DO SOLO, **29**, (5), 685-694, 2005.
- 11) White, R.E. and Taylor, A.W.； Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate, Journal of Soil Science, **28**, 48-61, 1977.
- 12) 八幡敏雄；土壌の物理，東京大学出版会，87-95，1986.
- 13) 飯塚文男，佐久間敏夫，岡島秀夫；畑土壌における水分と無機塩類の挙動(3)，日本土壌肥科学会誌，**49**，76-81，1981.
- 14) M.Tejada, C. Garcia, J.L. Gonzalez, M.T. Hernandez； Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation, Soil Biology & Biochemistry, **38**, 1413-1421, 2006.
- 15) Richards, L.A.； Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USA Department of Agriculture Handbook 60； USDA Government Printing Office, Washington DC., 1954.
- 16) David Austin； Influence of cation exchange capacity (CEC) in a tidal flow, flood and drain wastewater treatment wetland, ECOLOGICAL ENGINEERING, **28**, 35-43, 2006.
- 17) 久馬一剛編；最新土壌学，朝倉書店，80-83，1997.
- 18) 藤原俊六郎，安西徹郎，小川吉雄，加藤哲郎編；土壌用語辞典，農文協，239，1998.
- 19) 大羽裕，永塚鎮男共著；土壌生成分類学，養賢堂，247-251，1988.
- 20) 千葉グリーン技研，“芝生の基礎知識”，(オンライン)，入手先 < <http://www.chibagreen.co.jp/basic/index.html> >，(参照2007-01-18).
- 21) 桜井英博，柴岡弘郎，芦原坦，高橋陽介共著；植物生理学入門，培風館，309-314，2001.

Vegetation on the Soil Infiltration System Treating Livestock Wastewater - Diagnosing Soil Status with respect to Available Phosphorus and Salts Accumulation -

Shinji SAKURAI, Yoko FUJIKAWA, Masami FUKUI, Tastuhide HAMASAKI, Masataka SUGAHARA

ABSTRACT

In the overland flow wastewater treatments and the constructed wetlands, the purification by soil infiltration units is enhanced using vegetation. However, wetland plants (i.e. cattail (*Typha latifolia*)) and trees, rather than agronomic crops, have been used in conventional systems. We carried out laboratory-scale soil infiltration experiments using two forage crops, tall fescue (*Festuca arundinacea*) and white clover (*Trifolium repens*) while using livestock wastewater for irrigation. The purpose of the study was to clarify the amount of accumulation of available phosphorus and exchangeable cations in the soil and its effect on the plant growth. The application of livestock wastewater increased available phosphorus, and exchangeable potassium and sodium in the upper soil. The soil sodification, examined based on exchangeable sodium ratio and plant growth, was not very significant after 10 months of livestock wastewater application. Growing forage crops on the soil infiltration system may be a promising technology to improve crop production and treatment efficacy.

Key Words : Soil infiltration system, Forage crop, Available phosphorus, Soil sodification, Soil diagnosis