

## 多孔質資材を利用した畜産排水の低コスト蒸発散処理に関する研究

神辺須創哉<sup>1)</sup>・宮下理<sup>1)</sup>・浅岡丈楽<sup>2)</sup>・脇本亘<sup>3)</sup>・白波瀬歩

1) 茨城県県央農林事務所、2) 茨城県鹿行農林事務所、3) 茨城県営業戦略部営業戦略農産物輸出促進チーム

Low-cost evapotranspiration treatment of livestock wastewater using porous materials

Souya KABESU, Nori MIYASHITA, Jouraku ASAOKA, Wataru WAKIMOTO, Ayumi SHIRAHASE

### 要 約

畜産センター養豚研究所の施設内にビニールハウスを設置し多孔質資材を敷設後、上から最終処理水を散水して蒸発散能力について検討を行った。ビニールハウス内に敷設した資材の選定は、ラボスケールにて蒸発散量を比較して検討を行った。また、ビニールハウス内外の蒸発散量の差や送風効果の検討も併せて行った。その結果、蒸発散量や保水性から敷設資材はクリンカアッシュを選定した。また、ビニールハウス内で送風を行いながら蒸発散することで、ビニールハウス外よりも効率的に蒸発散処理ができることが確認された。実規模での蒸発散試験では、灌水チューブを利用した散水と塩ビ管を利用した散水を比較した結果、塩ビ管の方がやや高い蒸発散量となった。ラボスケール及び実規模試験の結果をもとに年間蒸発散量を試算した。その結果、年間で約 48,394L/棟の蒸発散処理が可能であると試算された。

キーワード：多孔質資材、蒸発散処理、石炭燃焼灰、畜産排水

### 緒 言

茨城県は全国第7位（2022年時点）の産出額を誇る養豚が盛んな県であり、県内では約45万頭（2023年時点）の豚が飼育されている<sup>1) 2)</sup>。そのうち約半数の養豚経営は霞ヶ浦流域に所在しているが、同流域内は「茨城県霞ヶ浦水質保全条例」により厳しい河川排水基準が定められており、畜舎排水の公共水域への放流が困難な状況である。このため、同流域内の養豚経営では、液状物は自己農地利用や蒸発散処理が主な処理方法とされているが、農地への過剰施肥や地下浸透による環境負荷が懸念されている。

蒸発散処理は放流が困難な地域において長く利用されている終末処理法であるが、蒸発散槽のメンテナンスが不十分であったり、夾雑物を含んだ処理水を流すことによって性能を十分に発揮できなくなっている施設が多く見られる。しかし、蒸発散施設の改修には多額の費用が生じるため、設置と管理が容易な新たな蒸発散処理技術の開発が求められている。

蒸発散に関する研究では、ペンマン法を用いた微気象法やライシメーターを用いた水収支法等を利用した蒸発散量の検討は多くなされている<sup>3)</sup>。しかし、その多くは作物や森林からの蒸発散<sup>4) 5)</sup>に関するものであり、畜産からは排出される最終処理水の蒸発散に関する研究報告は少なく、実規模で検討された事例はま

だない。

多孔質資材は表面に微細な孔隙を持ち、保水力や透水性に優れ、古くから土壤改良材として利用されている。その特性から高い蒸発散能力が期待できるが、高価であるためこれまであまり利用されてこなかった。しかし本県では、常陸那珂火力発電所（株）JERAで石炭を燃焼した際に発生するクリンカアッシュ（石炭燃焼灰）や梨剪定枝を圃場で炭化した果樹剪定枝炭化物など地域未利用資源とされる多孔質資材が安価に利用可能な状況にある。

そこで、本研究では設置と管理が簡便なビニールハウス（以下、ハウス）と多孔質資材を組み合わせた新たな蒸発散技術を検討し、畜産農家が浄化処理した畜舎排水を低コストで効率よく処理するシステムを開発することを目的とした。

### 材料および方法

#### 1 蒸発散特性に優れた多孔質資材の選定

##### 1) 供試資材

- ・クリンカアッシュ
- ・梨剪定枝炭化物
- ・ゼオライト
- ・畜産センター内土壌（以下、土壌）

## 2) 試験方法

複数の温度条件 (25°C、40°C、55°C) における蒸発散量を測定した。65°Cで24時間乾燥させた資材を30 cm×40 cmのアルミバットに500mL敷き詰め、蒸留水を250mL投入後、25、40、55°Cに設定した恒温機内に静置し、それぞれ5、24、29、48時間後の重量から蒸発散した量を測定した (55°Cは24時間後まで測定)。

## 2 ハウスの効率的な利用方法の検討

## 1) ハウスの有無による影響

## (1) 供試資材

1の結果から、供試資材はクリンカアッシュを用いた。

## (2) 試験方法

乾燥機内で65°C24時間風乾させた資材をプラスチックの舟 (63 cm×35 cm) に20L敷き詰め、蒸留水を1.1L散布後、ハウス内外にそれぞれ24時間静置した。24時間静置後の重量を測定することで、1日当たりの蒸発散量を測定した。また、ハウスの有無による年間の蒸発散量についても算出した。年間の蒸発散量の算出は、晴天と雨天に分けて行い、気象庁過去データより2023年の茨城県石岡市柿岡のデータを用いた。また、雨天時のハウス外の蒸発散量は0Lと定義した。季節区分は気象庁の区分に準じ、3月～5月を春季、6月～8月を夏季、9月～11月を秋季、12月～2月を冬季とし、6月6日～7月23日 (48日間) を梅雨とした。

試験は2023年5月10日 (春季、晴天)、6月8日 (梅雨、雨天) 7月5日 (梅雨、晴天)、7月25日 (夏季、晴天)、8月2日 (夏季、晴天)、10月20日 (秋季、晴天)、12月16日 (冬季、晴天)、2月7日 (冬季、雨天) に実施した。

## 2) ハウス内蒸発散の送風による影響

## (1) 供試資材

1の結果から、供試資材はクリンカアッシュを用いた。供試水は茨城県畜産センター養豚研究所の汚水処理施設から排出される最終処理水を用いた。

## (2) 試験方法

乾燥機内で65°C24時間乾燥させたクリンカアッシュを3L充填したプラスチックバット (30 cm×40 cm) に供試水を800mL散布し、重

量を測定した。その後、ハウス内に24時間静置し、重量を測定した。その差から、1日当たりの蒸発散量を算出した。

併せて、ハウス内の送風の有無による蒸発散量への影響を検討するため、資材上部に送風機を設置し、同様に蒸発散量を検討した (春季試験では未実施)。

試験は2022年5月1日 (春季)、6月22日 (梅雨)、9月3日 (夏季①)、9月16日 (夏季②)、10月2日 (夏季③)、12月8日 (冬季①)、12月16日 (冬季②) に実施した。

## 3 実規模での蒸発散試験

## 1) ハウスを利用した蒸発散量の検討

## (1) 供試資材

1の結果から、供試資材はクリンカアッシュを用いた。供試水は、茨城県畜産センター養豚研究所の汚水処理施設から排出される最終処理水を用いた。

## (2) 試験方法

## ① 灌水チューブを利用した散水の検討

養豚研究所内に設置したハウス (5.46m×14.56m) 内に防草シート、木枠、コンパネ、防水シートの順に設置を行い、防水シートの上にクリンカアッシュを敷設した (図1、敷設量約11.5t、蒸発散面積約58.56 m<sup>2</sup>)。角材とコンパネはビスで固定し、ハウス内を四角く囲うように設置した。同所内の汚水処理施設最終処理水を水中ポンプ (40PUA2.25S、株式会社鶴見製作所) により1 m<sup>3</sup>のローリータンクに貯留後、陸上ポンプ (JM-25H、株式会社工進) と硬質ポリ塩化ビニル管 (以下、塩ビ管) の配管を用いて、ハウス内両サイドに設置した灌水チューブ (ミストエース S54、住化農業資材株式会社) から散布した (写真1)。散水量は吉尾ら<sup>6)</sup>の結果から5 L/m<sup>2</sup>とし、58.56 m<sup>2</sup>×5 L/m<sup>2</sup>=292.8 L≒300 Lとした。また、2-1)の結果から、ハウス用換気扇 (すくすくファン、株式会社スイデン) を用いて常時送風を行い、ハウスは両間口を開放した。

蒸発散量は、資材に埋設した土壌水分センサー (10HS 土壌水分センサー、メータージャパン株式会社) およびデータロガー (ZL6Basic、メータージャパン株式会社) により測定した体積含水率から推定した。

ハウス内外の温湿度はおんどとり (RTR503、

株式会社ティアンドデイ)を用いて測定し、日照時間は気象庁過去データから茨城県つくば市(館野)の日照時間を参照した。試験期間は、2022年11月1日から2022年11月30日まで行った。

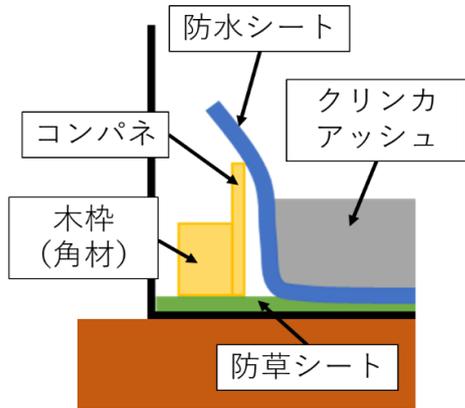


図1 ハウス内壁面詳細



写真1 灌水チューブからの散水

## ②塩ビ管を利用した散水の検討

3-1) -①の結果から、散布方法を灌水チューブから自作した有孔管に変更して蒸発散試験を実施した。有孔管は呼び径VP25の塩ビ管にドリルで40cm間隔5mmの穴を開けたものを利用した(写真2)。試験期間は2023年11月1日から2023年11月30日まで行った。



写真2 塩ビ管からの散布写真

## 2) 年間蒸発散量およびコスト試算

### (1) 計算方法

2-2)のラボスケールで試算した年間蒸発散量と実規模での実際の蒸発散量(秋季)を用いて、実規模での年間蒸発散量の試算を行った。

### 結果および考察

#### 1 蒸発散特性に優れた多孔質資材の選定

40°Cの条件で48時間経過後の結果において、クリンカアッシュが土壌、ゼオライトと比較して有意に高い蒸発散率であった。他の温度条件や蒸発散時間下では各資材間に有意差は認められなかった。(図2)

木質系炭化物の表面に存在する孔隙(細孔)は直径10~30nmの分布が多く、1g当たりの表面積である比表面積は300m<sup>2</sup>/g前後である<sup>7)</sup>。一方で、クリンカアッシュの表面に存在する孔隙は1~20μmと梨剪定枝炭化物と比較するとやや大きく、比表面積は約4.2m<sup>2</sup>/g程度である<sup>8)</sup>。予備試験で資材の保水力を測定したが、クリンカアッシュよりも梨剪定枝炭化物の方が高い保水性を示しており、これは梨剪定枝炭化物の比表面積の大きさが影響していると考えられる。資材の比表面積が大きいほど水を保持する力が強いと考えられ、蒸発散が起きにくくなり今回のような結果になったと考えられた。

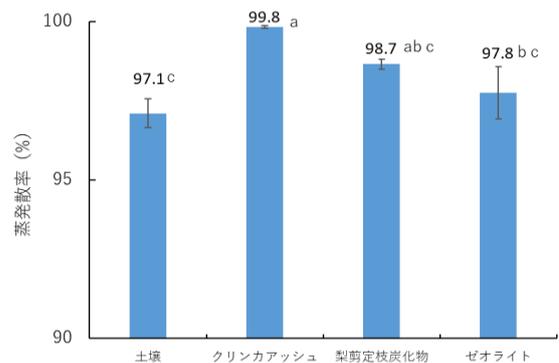


図2 40°C48時間後の蒸発散率

(n=3、P<0.05 異符号間に有意差有り)

## 2 ハウスの効率的な利用方法の検討

### 1) ハウスの有無による影響

ハウスが蒸発散量に及ぼす影響を表1に示した。天候が晴れの場合、ハウス内外に蒸発散量の差は確認されなかった。一方、雨天時は梅雨、冬季のみしか調査できなかったものの、ハウス内では蒸発散が確認された。ハウス外では降雨の影響によ

り、蒸発散量はマイナスの値を示した。

年間蒸発散量を算出した結果、ハウス内ではハウス外と比較して2倍近い蒸発散量となった(図3)。今回の計算では、降雨量全量が浸透せずに流れ出ていくことも考慮し、雨天時のハウス外の蒸発散量を0L/日で試算を行った。しかし、本来は降雨の影響により最終処理水の散水量以上の水が撒かれるため、一般的な露天の蒸発散では相対的に処理水の蒸発散量は減少すると考えられた。

表1 季節毎のハウス内外蒸発散量

【晴】	春季	梅雨	夏季	秋季	冬季
ハウス内 (L/日)	0.72	0.3	0.58	0.46	0.28
ハウス外 (L/日)	0.58	0.32	0.55	0.36	0.30
【雨】	春季	梅雨	夏季	秋季	冬季
ハウス内 (L/日)	-	0.5	-	-	0.14
ハウス外 (L/日)	-	-1.42	-	-	-4.68

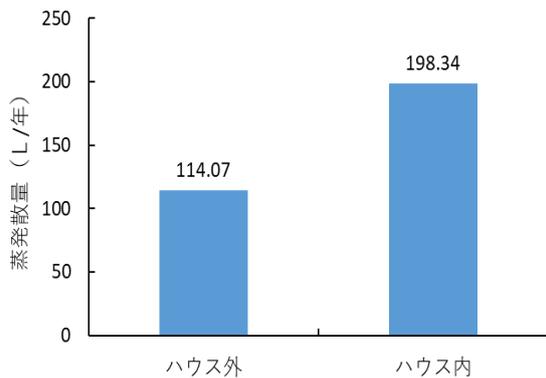


図3 ハウス内外における年間蒸発散量

2) ハウス内蒸発散の送風による影響

ハウス内温度の蒸発散量への影響を図4に示した。この結果から、蒸発散量はハウス内の温度に大きく依存することが示された。

送風による蒸発散量への影響を表2に示した。この結果から、全ての季節において、送風することにより蒸発散量が増加することが示され、ハウスを用い、かつ送風することでより効率的に蒸発散ができることが確認された。これらの結果は、温度上昇に伴う蒸発量の増加と、送風により水面付近の気液平衡状態の水分子が移動するため蒸発散量が増加したと考えられる。

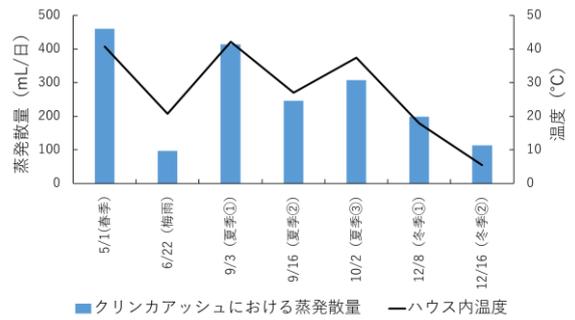


図4 ビニールハウス内温度の蒸発散量への影響

表2 送風の蒸発散量への影響 (平均)

	梅雨	夏季	冬季
蒸発散量(mL/日)			
送風有	97.5	322.8	156.2
送風無	79.4	305.9	106.3
増加率(%)	22.7	5.5	47.0

3 実規模ハウスでの蒸発散試験

1) ハウスを利用した蒸発散量の検討

①灌水チューブを利用した散水の検討

ハウス内の蒸発散量は、気温、湿度、日照時間、風向など様々な要因で変化するが、2-1)の結果と同様に概ね気温に影響を大きく受けることが確認された(図5)。ハウス内では日中の温度が上昇しやすく、ハウス外よりもやや高い温度で推移する結果となった。一方で、湿気が籠りやすく、湿度に関してはハウス外の方が低い値となった(表3)。

灌水チューブでの散水は、霧状で均一に散水が可能である。しかし、中空糸膜による処理を行っていない汚水を散水する場合、懸濁物質による詰まりを除去するためにフィルターの利用が必須であり、汚水の性状によってはかなりの頻度でフィルターの清掃、交換が必要になると考えられる。そこで塩ビ管を用いた、より簡便な方法での試験を実施した。

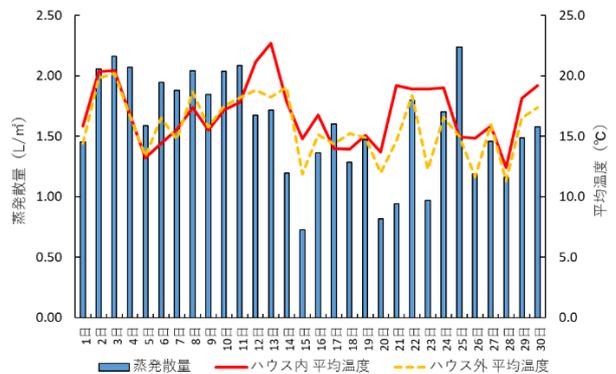


図5 灌水チューブ利用時の蒸発散量およびハウス内外温度

表3 灌水チューブ利用時の蒸発散量とハウス内外の温湿度

	蒸発散量 (L/m <sup>2</sup> ・日)	ハウス内		ハウス外	
		温度 (°C)	湿度 (%)	温度 (°C)	湿度 (%)
最大	2.24	20.4	92.8	20.2	90.3
最小	0.73	12.4	63.3	11.3	63.8
平均	1.62	17.0	79.4	16.1	74.6

②塩ビ管を利用した散水の検討

蒸発散量は散布方法を灌水チューブから塩ビ管へ変更した場合も2-1)、3-1) -①の結果同様に、気温の影響を受けることが確認された(図6)。11月6、7日付近で気温が高いにもかかわらず、蒸発散量が少ないのは、陸上ポンプの不具合により、十分量処理水を散布できなかったのが原因である。灌水チューブを利用した場合よりも平均蒸発散量は高い値を示している一方で、ハウス内の平均温度は低い結果となった(表4)。ハウス内の気温が低いのも関わらず、灌水チューブを利用した場合よりも蒸発散量が多い理由として放射冷却の影響が考えられる。灌水チューブを利用した試験期間よりも今回の試験期間の方が晴れている日数が多く合計日照時間が長いことから、日中の蒸発散量が増加する一方で、夜間は放射冷却の影響が強く表れ、平均気温の低下が起きたのではないかと考えられる。9)

灌水チューブまたは、塩ビ管を利用した際の各蒸発散率は、塩ビ管の方が灌水チューブと比べて3.9%高かった(表5)。これは合計日照時間の差が影響していると考えられることから、塩ビ管による散水は灌水チューブと同程度の効率で蒸発散処理が可能であると考えられた。

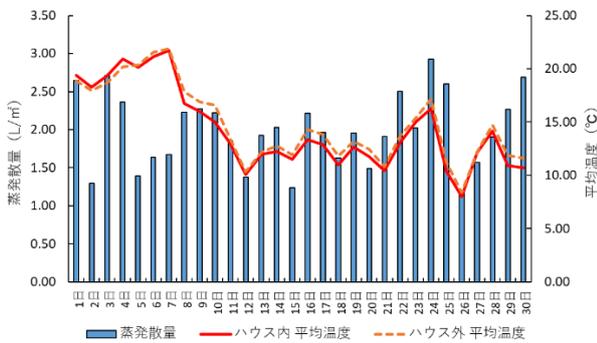


図6 塩ビ管利用時の蒸発散量およびハウス内外温度

表4 塩ビ管利用時の蒸発散量とハウス内外の温湿度

	蒸発散量 (L/m <sup>2</sup> ・日)	ハウス内		ハウス外	
		温度 (°C)	湿度 (%)	温度 (°C)	湿度 (%)
最大	2.93	21.7	93.4	21.9	90.9
最小	1.24	10.5	60.5	10.8	47.7
平均	2.06	14.7	74.3	15.2	65.4

表5 散水方法毎の蒸発散率

散水方法	灌水チューブ	塩ビ管
推定蒸発散量 (L/月)	2397.5	2654.1
蒸発散率 (%)	36.3	40.2
合計日照時間 (h)	160.7	182.3

2) 年間蒸発散量およびコスト試算

3-1) -①の結果を秋季の平均蒸発散量として2-2)の年間蒸発散量と同様に試算した結果、ビニールハウス内の年間蒸発散量は約48,394L/棟と試算された。年間にならすと1日あたり約133L/棟の蒸発散処理が可能であり、肥育豚換算で約8.8頭相当が見込まれる。

今回の試験装置に使用した資材および費用は表6のとおりである。今回ビニールハウスは設置費込みの価格であるが、自家施工した場合400,000円程度の価格に抑えられる。また、敷設資材として利用したクリンカアッシュも運賃込みの価格であり、自家用トラック等にて引取りできる場合は、600円/tで購入可能であり、かなり安価に入手が可能である。

本試験結果から、蒸発散処理施設にハウス等設置することにより蒸発散量の向上が示唆された。

表6 実模試験に利用した資材および参考価格

蒸発散処理施設試算				
品名 (仕様)	数量	単位	金額 (円)	備考
ビニールハウス (3間×8間)	1	式	567,924	設置費込み
ハウス用換気扇 (100V)	1	台	38,500	
クリンカアッシュ (12t)	1	式	115,500	運賃込み
木枠 (90mm×90mm×3000mm)	4	本	7,200	
防草シート (2m×30m)	2	巻	63,800	
防水シート (6.5m×15m)	1	枚	95,700	
水中ポンプ (100V)	1	台	48,180	
陸上ポンプ (100V)	1	台	58,300	
ローリータンク	1	個	130,000	
塩ビパイプ (送水用)	1	式	50,000	
塩ビパイプ (散水用)	1	式	16,874	
その他 (接着剤、シールテープ等)	1	式	2,000	
計			1,193,978	

参考文献

- 1) 「政府統計の総合窓口 (e-Stat)」、2023、豚-畜産統計調査 (農林水産省) 「飼養戸数・頭数」
- 2) 「政府統計の総合窓口 (e-Stat)」、2022、都道府県別推計統計表-生産農業所得統計 (農林水産省) 「実績」
- 3) 矢野友久、1989、蒸発散 (その 4)、農業土木学会誌、57 巻 7 号、623
- 4) 桜谷哲夫、堀江武、1985、作物の蒸発散に関する研究、農業気象、41 巻 1 号
- 5) 鈴木雅一、1991、森林からの蒸発散、水文・水資源学会誌、4 巻 2 号
- 6) 吉尾卓宏、羽成勤、井上雅美、相沢博美、2004、活性汚泥処理水の高能力蒸発散に関する研究、茨城県畜産センター研究報告、37 号、11-15
- 7) 千葉県木質バイオマス新用途開発プロジェクト高機能木炭部会、2009、サンブスギ木炭の新用途開発研究成果報告書、総括版、9-13
- 8) エネルギー土木委員会、2003、石炭灰有効利用技術について-循環型社会を目指して-、報告書、46-57
- 9) 原口智和、中野芳輔、黒田正治、1995、ビニールハウス内の水消費環境特性、九州大学農学部学芸雑誌、49 巻 3/4 号、169-177