

第V章 除塩牛ふん炭の作成のための効率的な灌水法と溶脱塩の挙動

第1節 緒言

家畜排泄物の利用においては、ふん尿に含まれる塩類の管理が重要となる (Pratt, 1979). 特に米国では、雨が少ない上に灌漑水の塩類濃度も高く、塩類集積が起りやすい環境条件にある (Eigenberg and Nienaber, 2003) ことから、家畜排泄物の塩類は利用上の大きな障壁となっている (Shapiro ら, 2005). 国内においても、施設栽培では濃度障害の発生を懸念して塩類の多い家畜ふん堆肥が敬遠される傾向にある. 牛ふんを炭化して縮減濃縮した牛ふん炭では、含有塩類の濃度がさらに高くなるため、農地還元の際に塩類対策は不可欠である. このため、本研究では第III章及びIV章において、牛ふん炭の主要塩類である塩素及びカリウムの除去に関する対策試験を行い、施用前に除塩炭に変える方法が有効であることを明らかにした. しかし、第IV章の除塩炭の作成方法においては、牛ふん炭に対して重量比で80倍もの水量で多量散水を行っており、実用規模の水洗工程に本手法を適用するとなると、水量の確保の点で難しいことが予測される. 従って、現実的な方法としては、牛ふん炭を野積みして雨にさらす除塩法が簡易で有望であると考えられる. この場合には、牛ふん炭の除塩に及ぼす降雨量や降雨強度の影響を事前に把握しておく必要があり、同時に除塩に伴う肥効成分のリン酸の流出に対する制御も重要になると考えられる. そこで、本章では、降雨による牛ふん炭の除塩過程を想定し、室内において、カラムに充填した牛ふん炭に、年間降雨量に相当する1,500mmに達するまで、2段階の灌水強度で定期的な灌水を繰り返し、牛ふん炭の降雨を利用した除塩に関する基礎データの収集を図った.

第2節 材料及び方法

1. モデル試験用のカラム装置と牛ふん炭の充填

試験場所は、千葉県農業総合研究センター内の環境機能研究室実験室とした. 試験中の実験室では、空調機によって室内の温度を概ね15～30℃に制御し、直射日光がカラムに当たらないように窓ガラスを遮光した. カラム充填用の牛ふん炭は、篩別をしていない直径数mm～2cm程度の硬い粒状のもので (写真5-1)、第IV章の第4-3表に示した化学性の牛ふん炭と同一の試料を供試した.

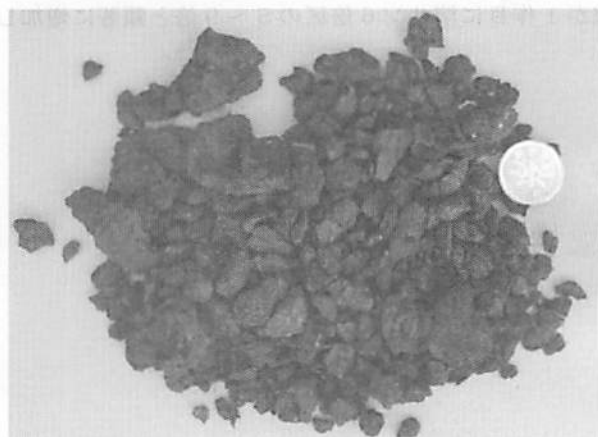


写真 5-1 カラム灌水除塩に供試した未篩の牛ふん炭 (注) 硬貨の直径は約2cm.

モデル試験用のカラム作成と牛ふん炭の充填方法については、高さ120cmのアクリル円柱 (内径100mm, 厚さ8mm) カラムを使用し、下部にプラスチック板と不織布のフィルターを合わせた有底の支持体を装着した. プラスチック板には直径5mmの穴を16個あけて通水部分とし、その下部にロートを装着して採水用のポリ容器と連結した (写真5-2). 牛ふん炭の充填は、少量の牛ふん炭をカラムに入れた後、手でカラムに軽い振動を与えながら詰め込む操作を順次繰り返し、可能な限り充填が緊密になるようにした. 最終的な高さは1m (7.85L容量, 2.1kg相当) に設定した.



写真 5-2 牛ふん炭カラム試験における採水状況

2. 灌水試験区の設定と調査及び分析方法

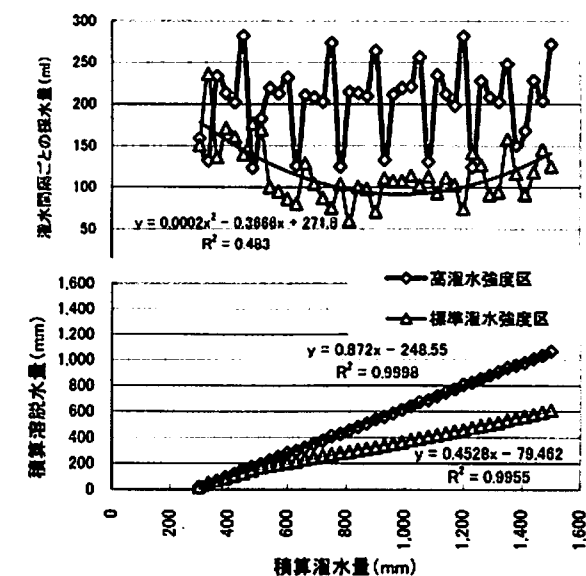
試験区は、最終的な積算水量を本地域の年間降雨量に相当する 1,500mm として、以下に示す 2 段階に灌水強度を変えた区を設定した。i) 標準灌水強度区では、平均的な降雨を想定して、1 週間毎に 1 日 30mm (30mm/週) を灌水する作業を 50 週間継続した。ii) 高灌水強度区では、集中的な降雨を想定して、1 週間毎に 5 日間連続して 1 日 30mm (150mm/週) を灌水する作業を 10 週間継続した。ただし、土曜及び日曜日の灌水は実施しない方式とした。1 回当たりの 30mm の灌水は、開放してあるカラム上部より、相当量の純水 236ml を静かに流し込んで行った。試験は反復なしで実施した。

調査の方法は、灌水直後から次の灌水直前までの溶脱水量を定期的に計測すると共に、1 回の灌水量に対する溶脱水量の回収比率（以下、採水効率）を求めた。採水間隔は、標準灌水強度区は 1 週間毎に、高灌水強度区では 1 日毎（土曜及び日曜日を除く、月曜日は 3 日後）とした。溶脱水の分析は、定期的に採水した溶脱水を 5℃ の冷蔵庫に順次保存して分析試料とし、EC 及び各塩類を第 IV 章までの方法に準じて測定した。なお、塩類が沈殿しやすい溶脱初期の採水試料は純水で 2 倍に希釈した後に保存した。また、各塩類の溶脱量を採水量と濃度の積から集計して、牛ふん炭中の各塩類の溶脱状況を評価した。

第 3 節 結 果

1. 灌水強度が牛ふん炭カラムの溶脱水量に及ぼす影響

標準灌水強度区は灌水開始後の積算灌水量が 330mm の時点、高灌水強度区では 300mm の時点で初めて溶脱水がカラム底部より採水された。牛ふん炭の灌水除塩中の 1 回当たりの灌水量 (236ml) に対する平均採水効率は、全積算灌水量の 1,500mm までにおいて、50 週間処理の標準灌水強度区では 49.5% と低く、10 週間処理の高灌水強度区では 86.7% と高かった。また、両区の積算溶脱水量は、積算灌水量に対して直線的に増加し、標準灌水強度区の積算溶脱水量は、積算灌水量 500mm, 1,000mm, 1,500mm の時点で、それぞれ 147mm, 373mm, 600mm、高灌水強度区では 188mm, 624mm, 1,060mm と算出された。その結果、灌水終了時の 1,500mm における後者の積算溶脱水量は前者の約 1.8 倍となった (第 5-1 図)。

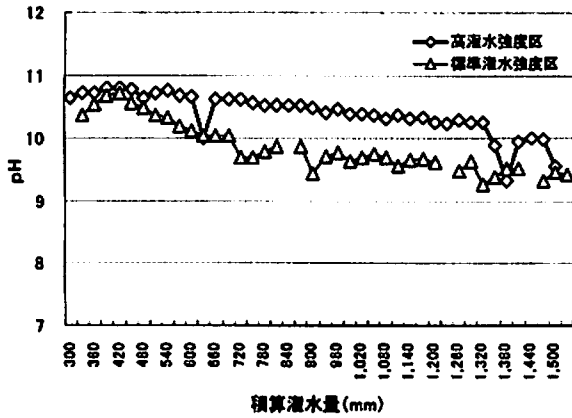


第 5-1 図 牛ふん炭の灌水除塩時の採水効率と積算溶脱水量

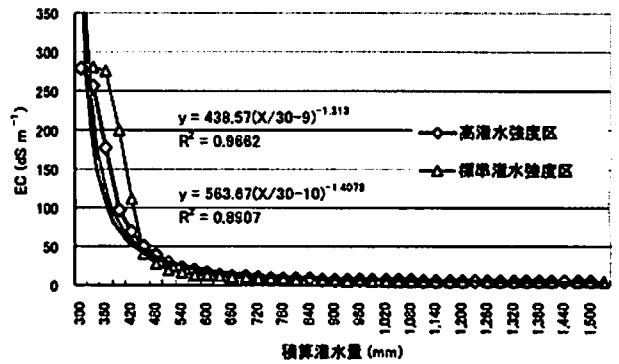
2. 積算灌水量及び灌水強度が溶脱水の pH 及び EC に及ぼす影響

溶脱水の pH は、標準灌水強度区及び高灌水強度区ともに、流出開始時の 10.5 程度から 1,500mm 灌水終了時の 9.5 程度まで約 1 程度低下した。標準灌水強度区では、高灌水強度区に比べて、pH は平均で約 0.6 低く推移した (第 5-2 図)。

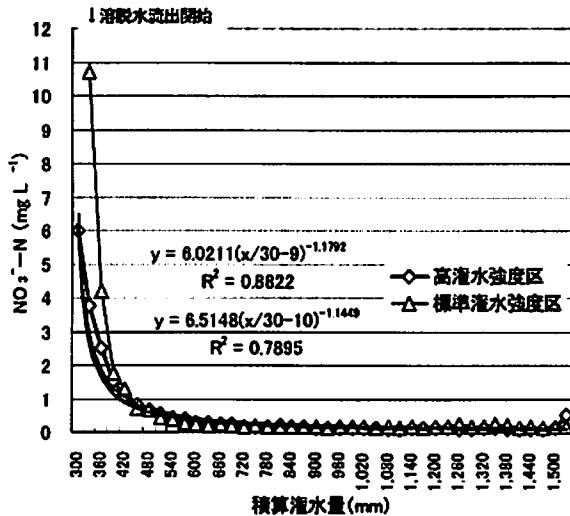
溶脱水の EC は、両灌水強度区において採水開始直後から約 280dSm⁻¹ と著しく高く、その後は積算灌水量の増加に伴い急激に低下した。EC の変動は灌水強度による差が小さく、いずれの区でも積算灌水量が 600mm では 13dSm⁻¹ 程度、1,200mm では 5 dSm⁻¹ 程度まで低下し、それ以降は積算灌水量が増しても EC の低下はわずかであった (第 5-3 図)。また、積算灌水量 (x) mm に伴う溶脱水 EC (y) dSm⁻¹ の低下の関係は、標準灌水強度区では、 $y=563.67 (x/30-10)^{-1.4078}$ 、高灌水強度区では、 $y=483.57 (x/30-9)^{-1.313}$ の累乗の曲線式に高い相関で近似された。



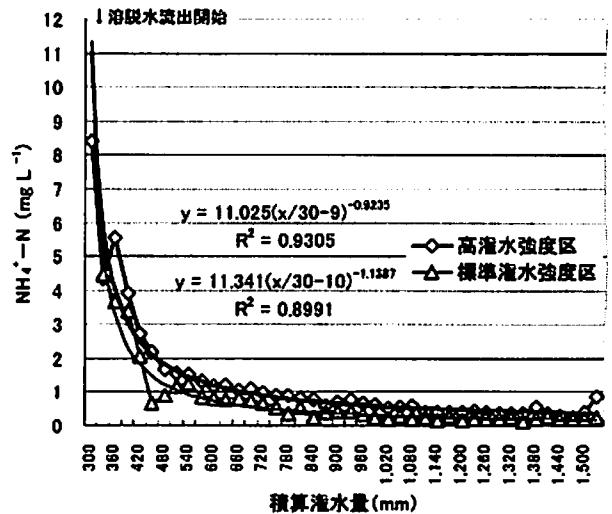
第 5-2 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水の pH に及ぼす影響



第 5-3 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水の EC に及ぼす影響



第 5-4 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水の無機態窒素濃度に及ぼす影響



3. 灌水除塩に伴う無機態窒素の溶脱

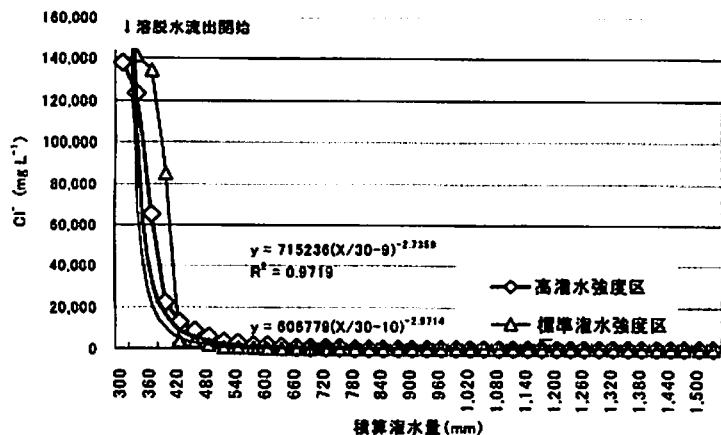
溶脱水の硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$) 及びアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$) は、採水開始直後に 10 mgL^{-1} 前後の窒素濃度を示したものの、 600mm 以降では概ね 1 mgL^{-1} 以下の低濃度で推移した。また、いずれの無機態窒素においても灌水強度による溶脱窒素濃度の違いはほとんど認められず、灌水量の増加に伴って、累乗の曲線式に従って窒素濃度が減少した (第 5-4 図)。

4. 灌水除塩に伴う溶脱塩素の濃度推移と収支

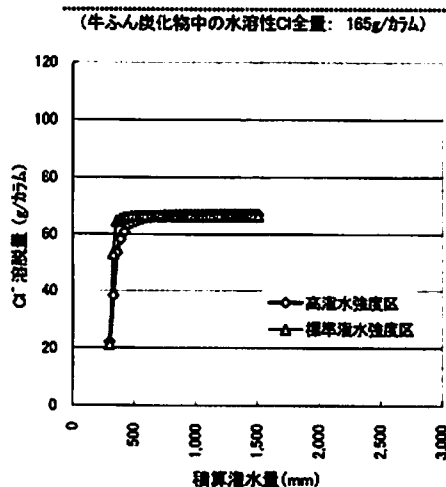
牛ふん炭中の多量塩類である塩素 (Cl^-) についても、両灌水強度区ともに積算灌水量の増加に伴って溶脱水中の Cl^- 濃度が低下した (第 5-5 図)。 Cl^- の濃度低下の

様相は、EC の場合と比べて、さらに急激であり、特に標準灌水強度区において顕著であった。溶脱水の Cl^- 濃度は、両区の採水開始直後の約 $140,000 \text{ mgL}^{-1}$ に対して、積算水量が 600mm の時点では、標準灌水強度区は約 40 mgL^{-1} 、高灌水強度区は約 137 mgL^{-1} と概ね $1/3,500 \sim 1/1,000$ に減少した。積算水量 (x) mm に伴う溶脱水中の Cl^- 濃度 (y) mgL^{-1} の低下は、標準灌水強度区では、 $y = 606,779 (x/30-10)^{-2.9174}$ 、高灌水強度区では、 $y = 715,236 (x/30-9)^{-2.7369}$ の曲線式に近似された。

Cl^- 積算溶脱量は、いずれの灌水強度区においても灌水量の増加に伴って急激に増加したが、標準灌水強度区では約 400mm 、高灌水強度区では約 600mm の積算灌水量に達すると、それ以降の Cl^- 溶脱量の増加がほとんど



第 5-5 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水の塩素濃度に及ぼす影響

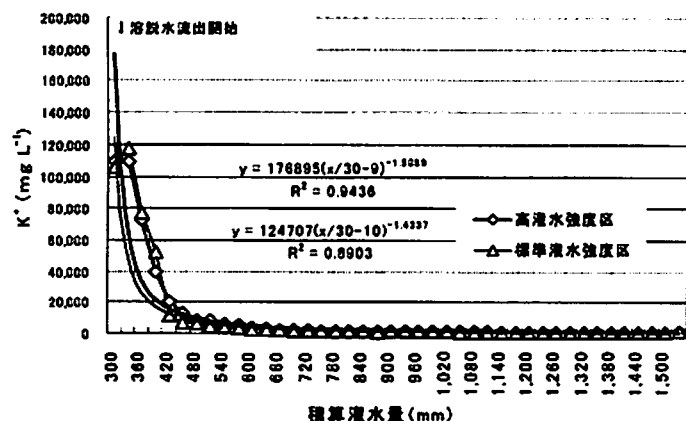


第 5-6 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭中の塩素の流出に及ぼす影響

認められない状態になった (第 5-6 図)。この結果、牛ふん炭カラム内の水溶性 Cl^- の全量 (165.1g) に対する標準灌水強度区及び高灌水強度区での Cl^- 積算溶脱量の割合は、600mm の灌水終了時では、それぞれ 40.2 %、39.7 % となり、1,500mm の灌水終了時では、それぞれ 40.3 %、40.6 % となった。

5. 灌水除塩に伴う溶脱カリウムの濃度推移と収支

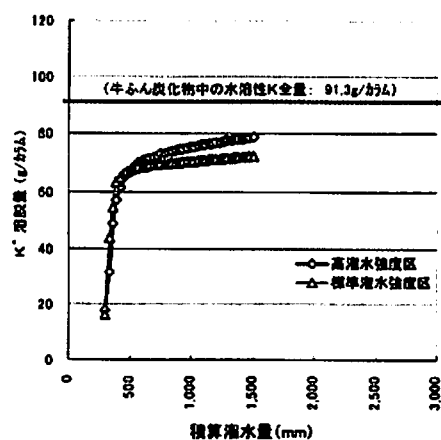
溶脱水中のカリウム (K^+) 濃度は、両灌水強度区ともに積算灌水が増加すると急激に減少した。 Cl^- の場合に比べると、さらに EC の変化と極めて一致した挙動を示した。また、積算灌水が 600mm 以上になると濃度変化が小さくなり、低濃度で推移した (第 5-7 図)。溶脱水の K^+ 濃度は、両区の採水開始直後の濃度 $110,000 \text{ mg L}^{-1}$ 前後に対して、積算水量が 600mm の時点では、標準灌水強度区では $1,106 \text{ mg L}^{-1}$ 、高灌水強度区では $1,226 \text{ mg L}^{-1}$ と概ね 1/100 に減少した。なお、



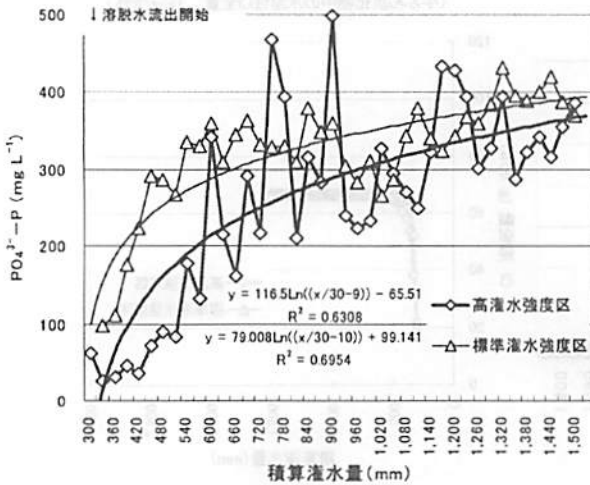
第 5-7 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水のカルウム濃度に及ぼす影響

両区の間で灌水強度による傾向の違いは認められなかった。積算灌水量 (x) mm に伴う溶脱水中の K^+ 濃度 (y) mg L^{-1} の低下は、標準灌水強度区では、 $y = 124,707 (x/30-10)^{-1.4337}$ 、高灌水強度区では、 $y = 176,895 (x/30-9)^{-1.8389}$ の曲線式に近似された (第 5-7 図)。

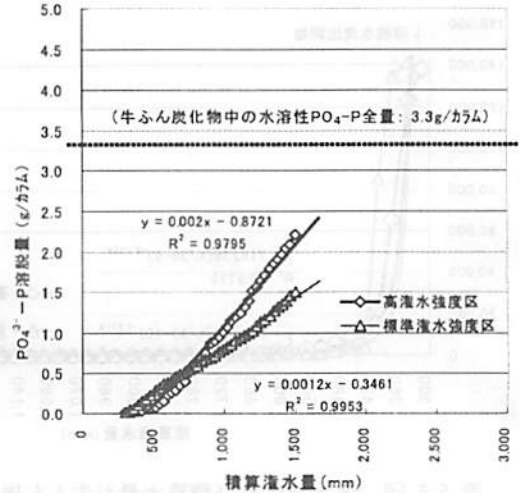
K^+ 積算溶脱量は、両灌水強度区ともに積算灌水 600mm まではほぼ同一の推移を示し、灌水量の増加に伴って急激に増加した。600mm 以降における両区の K^+ 溶脱量の増加は緩慢になったが、極めて直線的に微増しており、高灌水強度が標準灌水強度区を上回るようになった (図 5-8)。この結果、標準灌水強度区及び高灌水強度区における K^+ 積算溶脱量は、600mm の時点では、牛ふん炭中の水溶性 K^+ 全量 (158.6g) に対して、それぞれ 43.2 %、44.6 %、水溶性 K^+ 全量 (91.3g) に対しては、それぞれ 75.1 %、77.4 % となり、1,500mm の灌水終了時点では、前者は 45.6 %、49.7 %、後者は 79.3 %、86.4 % となった。



第 5-8 図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭中のカリウムの流出に及ぼす影響



第5-9図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭の溶脱水のリン酸濃度に及ぼす影響



第5-10図 灌水強度及び積算水量が牛ふん炭中のリン酸の流出に及ぼす影響

6. 灌水除塩に伴う溶脱リン酸の濃度推移と収支

溶脱水中のリン酸濃度 (P) は、両灌水強度区ともに積算積水量の増加に伴って上昇した。標準灌水強度区は、高灌水強度区に比べて若干高い濃度で推移した (第5-9図)。積算積水量 (x) mm に伴う溶脱水中の P 濃度 (y) mg/L の上昇の関係は、標準灌水強度区では、 $y=79.008\ln((x/30-10))+99.141$ 、高灌水強度区では、 $y=116.5\ln((x/30-9))-65.51$ の曲線式に近似された。

両区の P 積算溶脱量は、積算積水量に伴って直線的に増加した。600mm までは標準灌水強度区が高灌水強度区の溶脱量を上回ったが、それ以降の750mm 付近から、反対に高灌水強度区の溶脱量が勝るようになった (第5-10図)。その結果、標準灌水強度区及び高灌水強度区における P 積算溶脱量は、600mm の時点では、牛ふん炭中のク溶性 P 全量 (31.2g) に対して、それぞれ 1.2%、0.7%、水溶性 P 全量 (3.3g) に対して、それぞれ 11.8%、7.0% となり、1,500mm の灌水終了時点では、前者は 4.8%、7.1%、後者は 45.7%、67.3% となった。

第4節 考察

1. 灌水強度を変えた牛ふん炭カラム溶脱水の塩類濃度の推移と除塩指標

本章では、牛ふん炭を雨にさらす除塩法を想定し、降雨の基本的な影響を事前に把握する目的から、年間降雨量 1,500mm を上限の積算積水量とした 1m の牛ふん炭カラムの溶脱試験を室内で実施した。1週間に 1日 30mm 灌水する標準灌水強度区と 1週間の5日間に毎

日 30mm 灌水する豪雨想定の高灌水強度区を比較した結果、標準灌水強度区では、採水効率が高灌水強度区の約 87% に対して約 50% と著しく低く、採水間隔の1週間にカラムや採水容器から水分が蒸発した影響が考えられた。また、このような採水中の蒸発による濃縮が推定された標準灌水強度区では、溶脱初期において Cl^- 、 K^+ 及び P 濃度が高灌水強度区に比べて若干高い傾向が認められた。しかし、両区における積算積水量の増加に伴う溶脱水の Cl^- 及び K^+ 濃度の減衰様式、及び P 濃度の増加様式は極めて類似しており、除塩に与える灌水強度の影響は小さいものと判断された。以上のことから、牛ふん炭を雨にさらして除塩する方法では、降雨強度を考慮する必要性は小さく、積算の降雨量のみを目安にすればよいこと、降雨量が少ない場合には散水でその不足分を補えることが推察された。

積算積水量と除塩の関係を見ると、600mm を境に溶脱水の Cl^- 及び K^+ 濃度の低下が極めて緩慢になっており、この近傍が除塩効率の高い積算積水量であると考えられる。600mm は年間降雨量の約 2/5 に相当することから、1m の高さに野積みした牛ふん炭では、約5か月で除塩されると見積られる。ただし、この除塩に必要な期間は、平均的な降雨があることを前提にしたもので、また、牛ふん炭の野積みの高さによっても変わるため、大まかな指標に過ぎない。除塩の到達状況を確認するには、牛ふん炭の野積みの高さを考慮する必要のない溶脱水の EC を実測する方法が確実である。

カラム試験における溶脱水の EC は、累乗関数の減衰曲線を示した Cl^- 及び K^+ 濃度の推移とほぼ同様に変化

しており、除塩の指標として有効である。積算湛水量 600mm の時点のカラム溶脱水の EC は約 13dSm^{-1} であったが、本数値はコマツナの発芽率が低下し始める塩溶液の EC 5dSm^{-1} (山田ら, 1999) と比べると高い値である。このため、溶脱水の EC を 5dSm^{-1} に設定して牛ふん炭を水洗除塩する場合には、1,200mm の積算湛水量が必要となる。堆肥など特殊肥料に関わる品質保全推進基準 (1994 年, 農林水産省農蚕園芸局長通達) でも、1:10 (乾物 5) による水抽出で EC 5dSm^{-1} 以下が推奨されている。しかし、現状の家畜ふん堆肥では基準値を超える場合が多く、また、積算湛水量 600mm で作成した除塩炭を上記の水抽出率で測定すれば、EC は基準値に比べて大幅に低下するものと推察される。従って、積算湛水量 600mm の時点の EC 13dSm^{-1} 程度を指標に除塩を行っても、施用後に濃度障害の発生する危険性が小さい除塩炭が確保できるものと考えられる。

2. 牛ふん炭カラムの各塩類の溶脱量からみた効率的な除塩法

溶脱水の EC や塩類濃度は除塩の目安となるが、湛水強度や湛水量が除塩に及ぼす影響を正しく評価して効率的な除塩法を確定するには、牛ふん炭カラムの塩類の溶脱量と残存量を求めて塩類の収支を明らかにする必要がある。このような観点から、両湛水強度区における積算湛水量と各塩類の溶脱量の関係を第 5-6 図、第 5-8 図及び第 5-10 図に示したところ、塩類ごとに異なった特徴が認められた。すなわち、牛ふん炭中の Cl は 600mm 前後の積算湛水量まで極めて効率よく除去されたが、それ以降の 1,500mm までの湛水量では、いずれの湛水強度区においても全く除塩が進展せず、除塩効率の低下は明らかであった。両区における牛ふん炭中の水溶性 Cl 全量の収支は、約 40% が除塩されただけで、約 60% は牛ふん炭のカラム中に残存する結果となった。この原因については、次のような推論が考えられる。溶脱水はカラム内で牛ふん炭の塊同士の隙間 (粗孔隙) を通過しやすいので、隙間に面する塊外周部の Cl が溶けやすくなり、反対に、塊内部を通過する水量が減って内部の Cl が溶けずに残ったことが考えられる。

一方、K⁺では、Cl⁻のような完全な除塩の停滞は起こらず、600mm 以降でも緩やかな溶脱量の増加が認められ、特に高湛水強度区において標準強度区に比べて K⁺溶脱量の増加が顕著であった。両区の K⁺溶脱量に違いが生じた原因としては、P 溶脱量が積算湛水量に伴って直線的に増加し、かつ高湛水強度区の溶脱量が標準湛水強度区を 750mm 以降に上回ることから、600mm

程度までは Cl に付随して塊外周部の K⁺が溶脱し、その後 P 濃度の上昇に伴う K⁺の溶脱が始まったことが考えられる。これらの現象は、牛ふん炭を雨にさらした場合には、初期には塩化カリウム、中期以降はリン酸カリウムの溶出形態で除塩が進む可能性を示すものである。

以上のように、塩類の収支から求めた結果においても、高さ 1 m に野積みした牛ふん炭では、リン酸の損失を防ぐ点を考えると、積算水量を 600mm 程度に抑える除塩法が適切であることが示された。しかしながら、牛ふん炭中の水溶性 Cl 約 60%、水溶性 K⁺約 24% (K 溶性では約 56%) が依然として除塩されていないため、本除塩炭を農地に多量施用すると、除塩の促進対策が更に必要になる場合が想定される。この改善対策としては暫定的に以下の二つの方法が考えられる。一つは、牛ふん炭中の低含量である水溶性リン酸の流出は問題視せず、本画分の全量が流出すると推定される水量 2,000mm (第 5-10 図) まで湛水を行い、牛ふん炭中の K⁺成分の溶脱を積極的に促す方法である。もう一つは、Cl の溶脱が停滞する 600mm を経過した時点で、牛ふん炭の切り返しを行って塩類残存部分の湿潤化を図り、塩類の溶脱を促す方法である。後者は、仮説に基づいているため、実際に検証する必要があると考えられる。また、牛ふん炭を高く野積みするほど塩類の溶脱が遅れるため、除塩に必要な積算水量は野積みの高さに応じて求める必要がある。この高さによる除塩水量の補正に関しては、本試験において、湛水開始後の積算湛水量 300mm でカラム下端より溶脱水が発生し始め、次の 600mm の時点で除塩が目標段階に達したことから推定できる。すなわち、高さ 1 m の牛ふん炭カラムでは、最初の積算湛水量 300mm でカラム全体が飽水されて塩類が溶出し、次に加わる積算湛水量 300mm で塩類を含む飽水の押出しが起こり、300mm 単位でカラム内の水量が入れ替わって除塩が進展したのと考えられる。従って、牛ふん炭の高さを補正した除塩に必要な水量 y (mm) は、1 m のカラムの飽水量 300mm を基準にして、これに積載した高さ x (m) の積である次式、 $y=300x+300$ 、で概ね決まると考えられる。現在、このことを確認するために、著者等は、屋外において牛ふん炭のカラムの高さを変えた除塩試験を実施中である。

第5節 要約

牛ふん炭を雨にさらして除塩する際の降雨強度や積算降雨量の基本的な影響を把握するため、室内で牛ふん炭

を高さ1 mに充填したカラムの除塩試験を行った。1週間当たり30mm(1回)及び150mm(5回)の灌水強度で純水をカラム上部より合計1,500mmまで灌水し、灌水間隔ごとに採水した試料の水量と溶脱塩類の計測を行った。その結果、除塩に及ぼす灌水強度の影響は小さく、積算灌水量の影響が大きいことが示された。牛ふん炭中の過剰塩類である Cl^- 及び K^+ は、積算灌水600mmまでにそれぞれ約40%、約44%が急速に溶脱除去されたが、それ以降の除塩効率は大幅に低下した。

一方、有効成分の P_2O_5 は灌水量の増加とともに直線的に溶脱量が増大したものの、その溶脱量は1,500mmの灌水でも牛ふん炭中の可溶性 P_2O_5 の10%に満たないことが判明した。以上の結果から、牛ふん炭のリン酸肥効の損失を最小限に抑えて効率のよい除塩効果を得るためには、積算灌水量は600mm程度が適切であると判定された。しかし、牛ふん炭の除塩がさらに必要になる場合には、除塩水量の増加や堆積物の切り返しなどの処置を検討する必要があると考えられた。