

(35) クリーニングクロップ栽培と湛水の組み合わせによるハウス土壤集積塩類の除去特性

井上 賢大^{1*}・近藤 圭介¹・藤原 拓²・前田 守弘³・高岡 昌輝⁴
大年 邦雄²・山根 信三²・永禮 英明³・赤尾 聡史⁵

¹高知大学大学院総合人間自然科学研究科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

²高知大学教育研究部自然科学系農学部 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

³岡山大学大学院環境学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

⁴京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

⁵鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

* E-mail: b10m6f04@s.kochi-u.ac.jp

ハウス土壤集積塩類の新規除去技術の開発を目的として、クリーニングクロップのポット栽培試験を行った。その結果、湛水前にクリーニングクロップ栽培を行うことにより、湛水のみの条件と比較して硝酸イオンの溶脱量が4~15%にまで大幅に減少するとともにNaを除く土壤中水溶性塩類の約60%を除去でき、硝酸性窒素による地下水汚染防止と除塩を同時に実現可能であることが示された。各元素の除去特性については、N, P, Kに関してはクリーニングクロップによる吸収効果が大きいものに対して、Ca, Mg, Sについては湛水の効果が大きいことが示された。また、クリーニングクロップによるKの吸収量が非常に大きいことから、堆肥の連用によりK過剰となっている圃場では本手法による除塩が有効と考えられた。

Key Words : cleaning crop, flooding, greenhouse, nitrate, salt

1. はじめに

降雨による塩類の流亡がされず、栽培される作物の施肥量も多いハウス栽培では、露地栽培よりも土壤中塩類の集積が進行する。塩類集積が進行すると、植物の吸水阻害あるいは塩を構成している個々のイオンの生理作用による過剰害および塩基バランスの悪化を生じ、作物の生育障害が起こる¹⁾。土壌は、カリウム(K)は一般の野菜では生体中の含有率が5~6%になるまでは吸収するが、生育量は増加しないため、野菜はKをぜいたく吸収し、マグネシウム(Mg)やカルシウム(Ca)欠乏症を誘発すること、Caは石灰質資材の施用効果が大きく、過剰害も少ないが、土壌がアルカリ性となり、微量要素の欠乏症が発生しやすくなること、MgはCaに対して相対的に多くなると野菜の体内Mg濃度が高くなり、生体中のカルシウム濃度が低下することを述べている²⁾。このように塩類集積による野菜の生育障害は多くみられる。この対策として、作物栽培後の圃場に湛水を行い、土壌に集積した塩類を除去するという方法が一般に行われている。し

かし、湛水除塩は、硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)による地下水汚染とともに温室効果ガスである亜酸化窒素(N_2O)の放出を引き起こすことが報告されており³⁾、湛水に代わる除塩技術が求められている。

その一つとして、クリーニングクロップと呼ばれる吸肥能力の高い作物を塩類集積土壌で生育させる方法が提案されている⁴⁾。筆者らは、硝酸性窒素による地下水汚染対策として、クリーニングクロップによるハウス土壤集積窒素の除去を提案し、クリーニングクロップの栽培により溶脱率が大幅に低減すること、また草種に関してはトウモロコシの効果が最も大きいことを示している⁵⁾。作物による塩類吸収に関しては、トウモロコシの塩分抵抗性⁶⁾、塩ストレス土壌における塩類吸収についての研究⁷⁾などがあるが、ハウス土壤集積塩類の除去を目的として、クリーニングクロップ栽培と湛水を組み合わせた除去技術の開発を試みた事例は見当たらない。

そこで本研究では、異なる水分条件におけるクリーニングクロップ栽培をポット試験により実施し、栽培中およびその後の湛水期間中の窒素(N)および他の塩類成分

の動態を検討するとともに、本技術による塩類除去特性を明らかにした。

2. 実験概要

(1) 実験装置

高知大学農学部内のスイカ栽培後土壌(砂壤土: 粘土 18%, シルト 18%, 砂 65%)を用い、1/2000a ワグネルポット(藤原製作所)を使用して実験を行った。ポットには砂利 3kg, 防根透水シート(東洋紡績株式会社製), 土壌の順で投入した。土壌は、4.75mm 以下にふるい分け後、攪拌したものを風乾重で 10kg 秤量し、水 1.6L と混合後に充填した。テンシオメーターを各系列内の 1 ポットの深さ 15cm に挿入し、土壌水分を測定した。灌水は、テンシオメーターを挿入したポットの pF 値が指定した値より高くなると、同じ水分条件内のポット全体に灌水され、指定した値より低くなると灌水が止まる自動灌水制御システム(クリマテック株式会社製)で行った。なお、高知大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター農場の地下水を灌水に供した。ポット底面の排水口をアクリル管を挿入したシリコン栓で閉じ、その管と穴を開けたポリプロピレン瓶をチューブで接続することにより浸出水を採取した。水質の変化を防ぐため、ポリプロピレン瓶は保冷材を入れたクーラーボックス内で保管した。

(2) 栽培条件

実験は高知大学農学部内ハウスで、2009 年 8 月 23 日から 11 月 10 日まで行った。栽培する草種は筆者らによる過去の研究結果⁹⁾に基づき、短期間でも窒素吸収量の多いトウモロコシ(KD730)とし、ポット内の 3 箇所に各 3 個体を播種し、1 箇所につき 1 個体を残して残りは 10 日後に間引いた。土壌水分条件は、圃場容水量から生育阻害水分点までの範囲とし、系列 1(pF1.5±0.2), 系列 2(2.0±0.4), 系列 3(2.3±0.6)の 3 段階に設定した。各系列で栽培日数 20, 40, 60 日の試験区を設け、各々 3 反復で実験を行った。加えて、灌水のみを行うポット(blank)も 3 反復設けた。60 日というクリーニングクロップ栽培期間は、施設園芸ハウスでの夏季の休閑期間を想定して設定したものである。なお、系列 1(60 日)については間引き時に根を傷つけたと考えられるポットがあったため、2 反復として解析を行った。

(3) 灌水試験

灌水のみによる除塩を行った場合と、クリーニングクロップ栽培後に灌水した場合で、塩類除去特性がどの程度変化するかを検討する目的で灌水試験を行った。灌水期間は 2009 年 10 月 23 日から 11 月 5 日までとし、浸出

水が得られなくなった時点で試験終了とした。

60 日栽培後、blankを加えたすべてのポットの排水口にシリコン栓をし、湛水深が 1cm となるように上記の地下水を供給した。湛水期間は 2 週間とし、1 週間経過後に一度排水し、再び同じ条件で 1 週間湛水を行った。排水時には浸出水の採水を行った。湛水期間終了後、系列 1~3 の累積浸出水量と同等の条件で塩類溶脱量を比較する目的で、11 月 10 日に blank に追加灌水を行った。

(4) 分析方法

供給水は未ろ過試料を分析した。浸出水は pH, EC, 水量を測定後、ガラス繊維ろ紙(whatman GF/B: 粒子保持能 1μm)でろ過後、分析に供した。土壌抽出溶液は 1:5 水浸出法¹⁰⁾で作成し、ガラス繊維ろ紙でろ過後、試料とした。各試料の陽イオン、陰イオンは、イオンクロマトグラフ(DIONEX DX-120)により、無機態窒素は NP 自動分析装置(BRAN+LUEBBE AACS-II)により分析を行った。植物中含有元素については、K, Mg, Na, P は ICP 発光分光分析装置(ThermoELECTRON 製)で、Cl, S については波長分散型蛍光 X 線分析装置 ZSXPrimusII(株式会社リガク製)により分析を行った。

3. 結果および考察

(1) クリーニングクロップの生育状況

図-1に各系列におけるトウモロコシの乾物重の推移を、

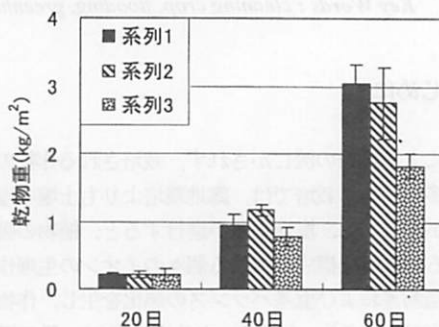


図-1 各系列乾物重の推移

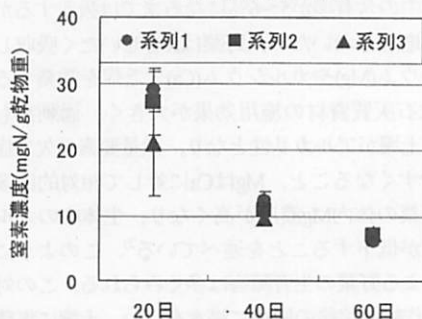


図-2 植物含有窒素濃度の推移

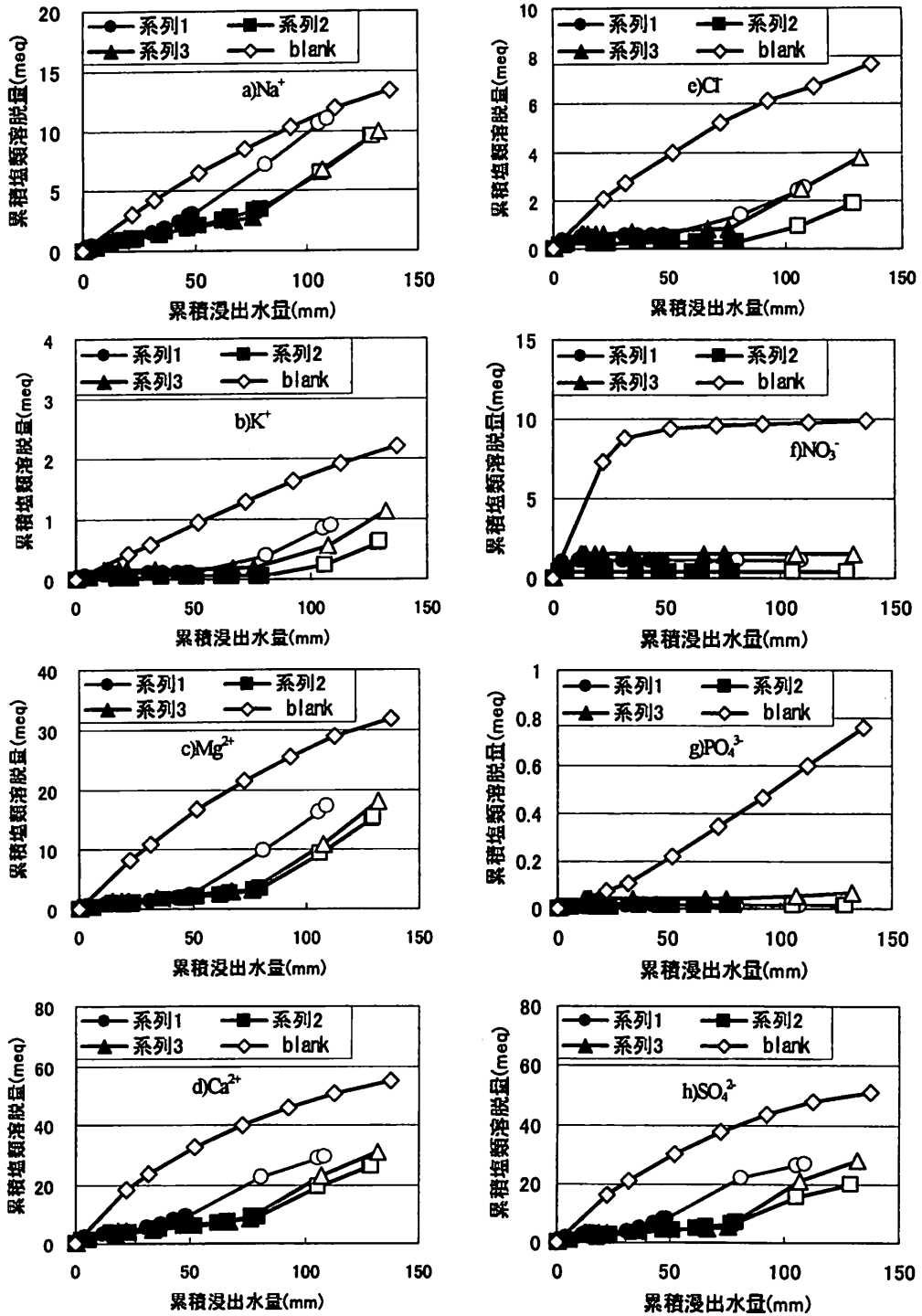


図3 累積浸出水量と累積塩類溶脱量の関係
(図中の白抜き記号は湛水期間のデータを示す)

表-1 初期土壌および実験終了時の土壌中水溶性塩類含有量

土壌	EC(mS/cm)	土壌中水溶性塩類含有量(meq/kg乾土)								
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	
初期土壌	0.314	1.09	0.44	1.77	2.44	0.31	1.13	0.32	2.27	
終了時土壌	系列1	0.126	1.99 ± 0.10	0.18 ± 0.06	0.95 ± 0.03	1.35 ± 0.02	0.37 ± 0.15	0.03 ± 0.00	0.19 ± 0.01	1.20 ± 0.06
	系列2	0.126	1.66 ± 0.07	0.16 ± 0.02	0.77 ± 0.11	1.11 ± 0.15	0.38 ± 0.13	0.01 ± 0.00	0.19 ± 0.02	1.24 ± 0.45
	系列3	0.130	1.90 ± 0.19	0.16 ± 0.03	0.96 ± 0.16	1.31 ± 0.23	0.30 ± 0.05	0.01 ± 0.01	0.20 ± 0.04	1.32 ± 0.38
	blank	0.078	1.51 ± 0.50	0.14 ± 0.00	0.45 ± 0.04	0.64 ± 0.04	0.22 ± 0.23	0.06 ± 0.03	0.31 ± 0.10	0.14 ± 0.04
施設土壌 ¹¹⁾	0.68	3	5	9	16	3	11	3	11	
施設土壌 ¹²⁾	1.51	10	5	22	23	11	20	1	28	

図-2に乾物重あたりの植物含有窒素濃度の推移をそれぞれ示す。なお以下の図においてエラーバーは標準偏差を示している。いずれの系列においても、栽培日数の経過にともない乾物重が指数関数的に増加したのに対応して、植物含有窒素濃度は減少した。また、乾燥条件下で栽培した系列3では、乾物重が少ない結果となった。本研究におけるクリーニングクロップの1m²あたりの乾物重は筆者らによる過去の研究⁹⁾における乾物重の約2倍になった。これは栽植密度の違いによるものと考えられる。また、植物含有窒素濃度は栽培開始60日後には10mg/Vg乾物重程度まで減少しており、過去の研究結果と一致した。

(2) 塩類の溶脱特性

初期土壌、湛水試験終了時の土壌および塩類集積した実圃場における水溶性塩類含有量を表-1に、累積浸出水量と累積塩類流出量の関係を図-3に示す。ここで、図中の白抜き記号は湛水期間のデータを示している。今回使用した土壌は施設¹¹⁾と比較して水溶性塩類含有量は少なかった。図-3に示すように、NO₃⁻はblankと比較するとクリーニングクロップ栽培系列では溶脱量が4~15%と大幅に減少しており(P<0.05)、クリーニングクロップ栽培が硝酸性窒素による地下水汚染防止に有効であることが実証された。この結果は筆者らによる過去の研究結果⁹⁾とも一致する。また、リン酸(PO₄³⁻)についても溶脱量が2~8%に減少した(P<0.05)。他の塩類は、blankと比較するとナトリウム(Na⁺)は同程度の溶脱量であったのに対して、その他の塩類については総流出量が28~57%になった(P<0.05)。これらの塩類は、栽培時には流出量が少なく、湛水時には流出量が多くなるという傾向を示し、クリーニングクロップ栽培時に残存した塩類をその後の湛水により流亡させる必要があることが明らかとなった。表-1に示すように、クリーニングクロップ栽培系列における実験終了時土壌のEC値は、初期土壌と比較すると40~42%となり、土壌中塩類の除去が十分になされた。以上より、クリーニングクロップを栽培し、その後湛水を行うことにより、NO₃⁻の溶脱量を大幅に減少させ、かつ土壌中の水溶性塩類を本実験条件下では60%程度削減

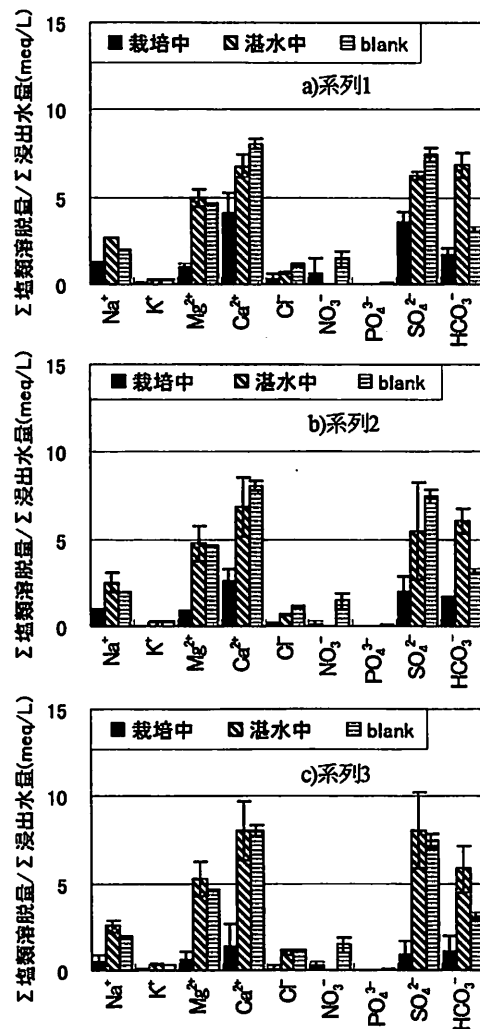


図4 栽培中、湛水中、blankにおける各塩類の流出濃度

できることが示された。

次に栽培中、湛水中およびblankにおける浸出水中の平均塩類濃度を、各期間における総塩類溶脱量を総浸出水量で除することにより算出した。図-4に結果を示しているが、K⁺、PO₄³⁻については栽培中、湛水中およびblankの濃度が低く、その他の塩類の流出濃度は、blank≒湛

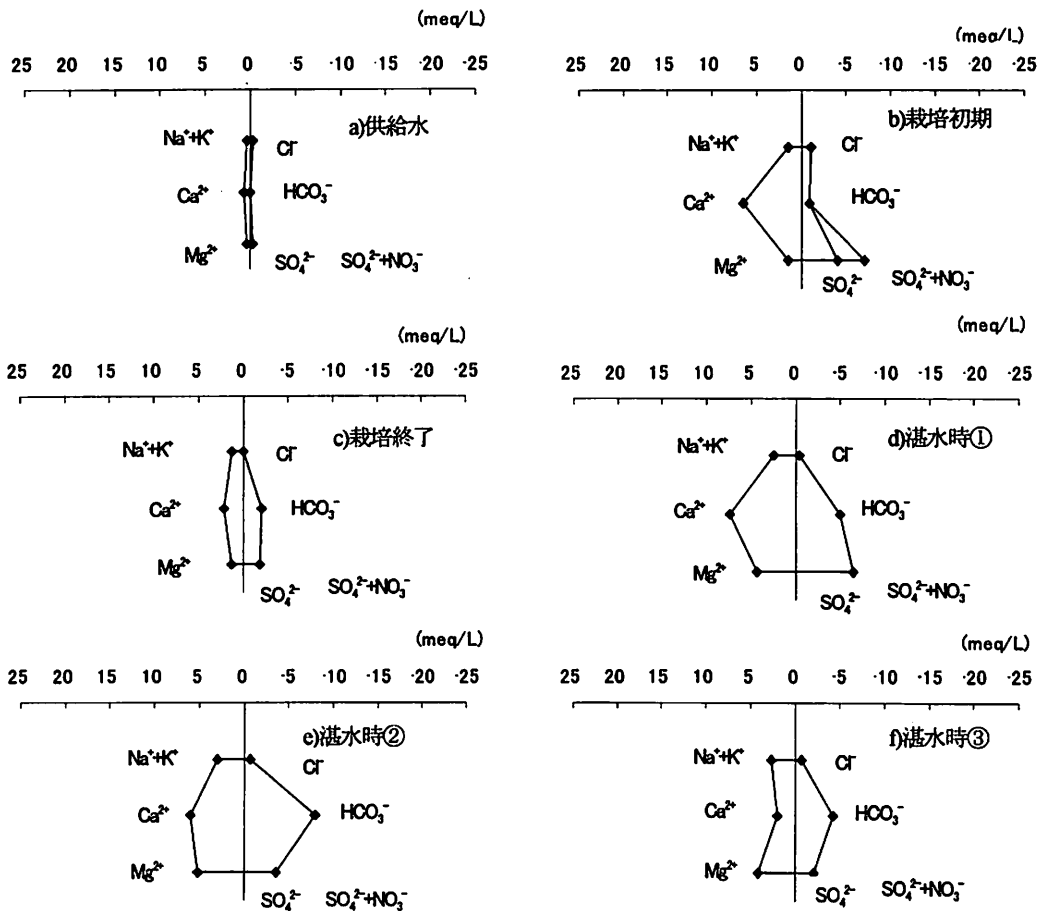


図5 系列2における浸出水のヘキサダイアグラム

水中>栽培中という順になった。 Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} はいずれの系列においても、栽培中よりも湛水中に大幅に濃度が増加した。これより、この3種の塩類は、特に湛水による除塩が必要であることが推察される。

次に、浸出水の塩類組成を考察する目的で、図-5に供給水および系列2の栽培初期（8月23日）、栽培終了時（10月21日）、湛水時（10月29日、11月5日、11月7日）における浸出水の水量加重平均濃度に基づくヘキサダイアグラムを示した。栽培初期に多かった Ca^{2+} および NO_3^- は栽培終了時には大幅に減少した。湛水時には Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} が多量に流出するようになり、湛水期間が継続すると、 Ca^{2+} , SO_4^{2-} が減少した。以上より、クリーニングクロープで吸収しきれなかった Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} については、湛水による除塩効果が大いことが示された。

(3) クリーニングクロープの元素吸収特性

図-6に各系列の植物中元素濃度および元素吸収量を示すとともに、図-7に系列2における植物部位別の元素含有濃度を示す。含有濃度に関しては各系列間で差はなかった。一方、吸収量については乾物重の少ない系列3では各元素の吸収量が少ない結果となった。元素間を比較

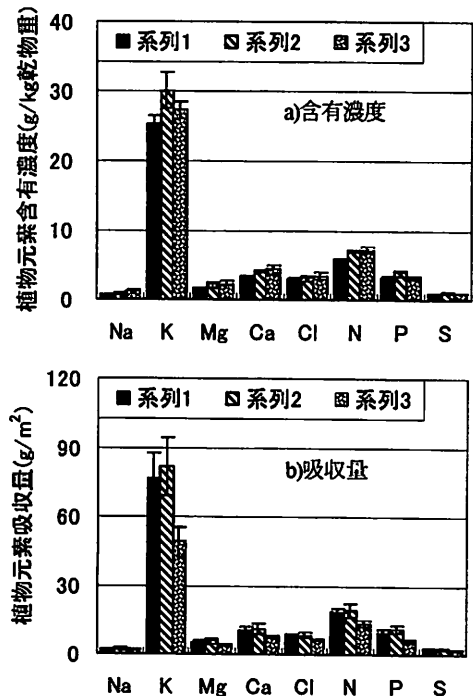


図6 植物中元素濃度および元素吸収量

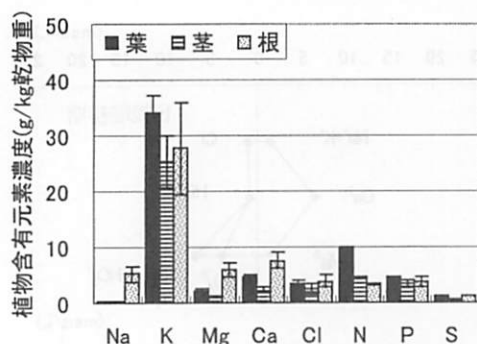


図-7 植物中部位別元素含有濃度

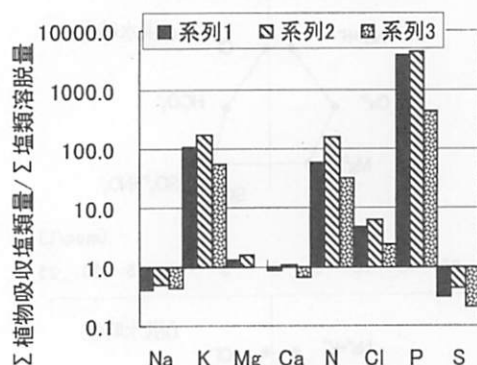


図-8 塩類総流出量に対する植物総吸収量の比

するとKの濃度および吸収量が非常に多かった。小柳ら¹³⁾によると家畜ふん堆肥中の塩類濃度は高く、特にKが多く含まれていることが示されている。そのため、堆肥の連用によりKが過剰となっている圃場で、クリーニングクロップを栽培することにより、K過剰の改善に寄与すると考えられる。部位別濃度に関しては、Nが葉で高かった($P<0.05$)のに対して、Na, Mgは根で高かった($P<0.05$)。これらはクリーニングクロップをバイオマス資源として再利用する際に根を含めて収穫するかどうかを検討する上で重要な知見になると考えられる。

次に、各塩類の総溶脱量に対する総植物吸収量の比を図-8に示す。図より、比が1より小さいNa, Sは溶脱により、1より大きいK, N, Cl, Pは植物吸収で除去されたことがわかる。吸収率が最も高かった元素はPであり、次いでN, Kであった。N, P, Kに関しては浸出水への溶脱量も少量であり、クリーニングクロップによる吸収効果が特に高いと考えられる。また、乾燥条件下で栽培を行った系列3では、他の系列と比較して吸収効果が低いことも示された。

4. 結論

本研究では、施設栽培で問題となっている塩類集積に着目し、クリーニングクロップ栽培と湛水の組み合わせ

によるハウス土壌集積塩類の除去特性を検討する目的で実験を行った。得られた主要な成果を以下にまとめる。

- (1) クリーニングクロップ栽培系列では、 NO_3^- の溶脱量が湛水のみを行ったblankと比較して4~15%にまで大幅に減少し、クリーニングクロップ栽培が硝酸性窒素による地下水汚染防止に有効であることが実証された。また、 PO_4^{3-} の溶脱量もblankと比較して2~8%まで大幅に減少した。
- (2) クリーニングクロップ栽培後に湛水を行うことにより、本実験条件下では Na^+ を除く土壌中塩類の約60%を除去できることが示された。
- (3) N, P, Kに関しては溶脱量が少なく、クリーニングクロップによる吸収効果が大いことが示された。一方、 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} については、湛水による除塩効果が大いことが示された。
- (4) クリーニングクロップによるKの吸収量が非常に大きかったことから、堆肥の連用によりK過剰となっている圃場では、クリーニングクロップ栽培がK過剰の改善に寄与すると考えられた。

謝辞：本研究の遂行に際して協力いただいた、高知大学(JST, CREST)の深堀秀氏、高知大学技術職員の竹村泰雄氏および浦部光治氏に謝意を表す。なお、本研究はJST, CRESTおよび科学研究費補助金基盤研究(B)(21310054)の補助により行われた。

参考文献

- 1) 高橋英一：植物における塩害発生の機構と耐塩性、塩類集積土壌と農業、pp.123-154、日本土壌肥科学会、1991
- 2) 土屋一成：農業資材多投に伴う作物栄養学的諸問題 1 野菜および畑作物の要素過剰の実態、日本土壌肥科学雑誌、第61巻、第1号、pp.98-103、1990
- 3) 貞松篤志、藤原拓、大年邦雄、前田守弘：施設園芸ハウスにおける湛水が亜酸化窒素の生成・放出に及ぼす影響、環境工学研究論文集、第45巻、pp.459-466、2008
- 4) 小野信一：施設栽培土壌における塩類集積と過剰障害の現状および対策、日本作物学会記事、第68巻、別2号、pp.315-320、1999
- 5) 近藤圭介、藤原拓、大年邦雄：クリーニングクロップによるハウス土壌集積窒素の除去に関する基礎的検討、環境工学研究論文集、第46巻、pp.313-319、2009
- 6) 森下豊昭、瀬川雅裕、岩橋誠、香川邦雄、太田安定：キュウリ・トウモロコシ・ハウレンソウによるカチオン吸収の生育時期別変化と塩分抵抗性と

- の関係, 日本土壌肥科学雑誌, 第 55 巻, 第 3 号, pp.263-268, 1984
- 7) 下瀬昇: 作物の塩害生理に関する研究(第 8 報) トウモロコシ, ルーサン, イタリアングラスの耐塩性について, 日本土壌肥科学雑誌, 第 39 巻, 第 12 号, pp.554-557, 1968
- 8) 山内益夫, 秋友勝, 藤本貴久, 長井武雄: 各種作物におけるカチオンの吸収に及ぼす高濃度ナトリウム塩添加の影響, 日本土壌肥科学雑誌, 第 65 巻, 第 2 号, pp.157-164, 1994
- 9) 河崎利夫, 森次益三: 作物による一価カチオンの吸収・移行に対するカルシウムの影響-特に作物の塩類濃度障害との関連について-, 日本土壌肥科学雑誌, 第 44 巻, 第 3 号, pp.89-96, 1973
- 10) 土壌環境分析法編集委員会: 土壌環境分析法, pp.204-208, 1997
- 11) 中野明正: 施設土壌における塩類集積の現状と低硫酸根緩効性肥料による化学ストレスの改善, 日本土壌肥科学雑誌, 第 72 巻, 第 2 号, pp.237-244, 2001
- 12) 瀧勝俊: 施設土壌における硫酸塩蓄積の原因(1) 東三河地域トマト施設土壌について, 愛知農総試研報, pp.271-280, 1991
- 13) 小柳渉, 安藤義明, 水沢誠一, 森山則男: 家畜ふん堆肥中の塩類組成の特徴, 日本土壌肥科学雑誌, 第 75 巻, 第 1 号, pp.91-93, 2004

(2010.5.21受付)

Removal of salts accumulated in the topsoil of greenhouses by using cleaning crop cultivation coupled with flooding activity

Kenta INOUE¹, Keisuke KONDO¹, Taku FUJIWARA², Morihiro MAEDA³, Masaki TAKAOKA⁴, Kunio OHTOSHI², Shinzo YAMANE², Hideaki NAGARE³ and Satoshi AKAO⁵

¹Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University

²Agriculture Unit, Research and Education Faculty, Kochi University

³Graduate School of Environmental Science, Okayama University

⁴Graduate School of Engineering, Kyoto University

⁵Graduate School of Engineering, Tottori University

Flooding activities for the removal of salts accumulated in the topsoils of greenhouses are reported to induce both nitrate pollution of groundwater and nitrous oxide emission. This study, therefore, aims to develop a novel removal method, consisting of cleaning crop cultivation and flooding activities. This new method decreased the leached amount of nitrate to 4-15% compared to that by flooding activities alone, and about 60% of salts except for Na⁺ were removed. These results demonstrated that this new method realized the removal of accumulated salts without the induction of nitrate groundwater pollution. The N, P and K were mainly removed by cleaning crops, while Ca²⁺, Mg²⁺ and SO₄²⁻ were leached by flooding activities afterwards. Extraordinary uptake of K by cleaning crops implies that this new method is effective for farmlands where K is oversupplied by the continuous application of compost.