

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310054

研究課題名（和文）クリーニング作物と乳酸発酵を核とした地下水硝酸汚染抑制・資源循環システムの構築

研究課題名（英文）Development of a novel system consisting of catch crop cultivation and L-lactate fermentation of harvested biomass for nitrate groundwater pollution control and resource recovery

研究代表者

藤原 拓 (FUJIWARA TAKU)

高知大学・教育研究部自然科学系・教授

研究者番号：10314981

研究成果の概要（和文）：

クリーニング作物栽培と湛水の併用により、施設栽培土壌の除塩と地下水汚染抑制を同時に実現可能であった。また収穫したクリーニング作物は糖分の加水分解が容易であり、植物体の分解物を用いて乳酸発酵が問題なく行えることを確認した。さらに、収穫物を粉碎後に水に浸し、カルシウムを添加することで、バイオマス中リンの80%程度を回収できた。以上より、提案システムによる地下水硝酸汚染抑制と資源循環が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Catch crop cultivation followed by flood irrigation simultaneously realized the reduction of nitrogen leaching and removal of salts accumulated in the topsoil of greenhouse horticulture. Polysaccharides in the corn biomass cultivated as a catch crop was easily hydrolyzed, and the L-lactate fermentation using sugars derived from the biomass was demonstrated. Around 80% of phosphorus in the corn biomass was recovered by soaking powdered biomass in distilled water and calcium addition to the extract. These results demonstrated that the proposed system was effective for the prevention of nitrate groundwater pollution and resource recovery.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境技術、環境材料

キーワード：環境負荷低減技術、環境修復技術、クリーニング作物、乳酸発酵、資源循環システム

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、沿岸施設園芸地域を対象として、硝酸性窒素による地下水汚染の機構解明

を目的とした研究を実施してきた。その結果、土壌表層の除塩を目的として夏季の休耕期間に実施される湛水により、地下水中の硝酸

性窒素濃度が急増するとともに、湛水が温室効果ガスである亜酸化窒素 (N_2O) の放出にも極めて大きな影響を及ぼすことが明らかになった。また、帯水層に粘土層が存在する場合には脱窒が生じることが内外の研究者により明らかにされており、地下水硝酸性窒素の原位置除去法の開発が期待されている。

硝酸性窒素による地下水汚染を防ぐには、適切な施肥管理に加えて、間作として緑肥作物等のクリーニング作物を導入し、土壌に残存する NO_3^-N を回収する方法が有効である。しかし、クリーニング作物導入時の窒素溶脱・ N_2O 放出抑制効果を調査した事例は少なく、定性的な評価にとどまっている。また、クリーニング作物収穫物自体の処分も検討する必要があるが、この収穫物を系外へ持ち出し利用することにより、栄養塩の回帰および N_2O の放出を抑制するとともに、資源としての利用が期待される。本研究では、収穫物のポリ乳酸化を目指す。ポリ乳酸はバイオマスから生成される生分解性樹脂であり、生分解性という特殊用途のために高付加価値な取引が期待でき、農業用資材や原位置脱窒の水素供与体としての利用も可能である。作物残渣や収穫物をポリ乳酸の原料として利用するには前処理である糖化法の検討が必要である。さらに、近年の肥料価格の高騰が問題となっており、クリーニング作物収穫物からリン等を回収して肥料として再利用することが期待される。

2. 研究の目的

- (1) クリーニング作物の窒素吸収量および NO_3^- 溶脱・ N_2O 発生の抑制効果を明らかにし、土壌浄化機能とバイオマス生産機能の両面から効果的な栽培条件を提示する。
- (2) ポリ乳酸を水素供与体として活用した地下水硝酸性窒素の原位置除去法の検討を行う。
- (3) 作物収穫物の前処理を含む糖化方法を確立するとともに、糖化物の L-乳酸発酵を実施する。
- (4) クリーニング作物収穫物からのリン回収プロセスを開発する。

3. 研究の方法

- (1) クリーニング作物による硝酸性窒素溶脱・ N_2O 放出抑制技術の開発

ポット試験栽培、ライシメータ試験、試験農場での栽培を組み合わせ、かつ高知および岡山という気候・土壌が異なる2地域を対象として、クリーニング作物の栽培試験を実施する。窒素吸収、溶脱抑制、 N_2O 放出抑制、乳酸発酵のためのバイオマス生成の観点から栽培条件を実験的に検討する。

- (2) ポリ乳酸を水素供与体として活用した地下水硝酸性窒素の原位置除去法の検討

分子量・構造が異なる複数のポリ乳酸を用いてラボスケールのカラム試験および回分試験を行い、土壌中での脱窒に及ぼす影響因子を検討する。

- (3) 作物収穫物の糖化・L-乳酸発酵プロセスの開発

(1) で収穫されたクリーニング作物を用いて糖化・L-乳酸発酵を行う。糖化方法として酵素糖化を採用するが、その際に重要となる前処理を検討する。アルカリ系、酸系および水熱系の処理を比較する。また、得られた糖化物の L-乳酸発酵を実施する。発酵法として高温 L-乳酸発酵を用いるが、同法がバイオマス由来糖の発酵に適している点を確認する。

- (4) クリーニング作物収穫物からのリン回収プロセスの開発

クリーニング作物収穫物からのリンの溶出条件を検討するとともに、溶出されたリンを結晶として回収するための操作因子を検討する。

4. 研究成果

- (1) クリーニング作物による硝酸性窒素溶脱・ N_2O 放出抑制技術の開発

2009年(8/23~11/10)に、高知大学農学部内の施設園芸ハウスにおいて、クリーニング作物栽培時の土壌水分が窒素溶脱および N_2O 放出に及ぼす影響をポット栽培試験により検討した(飼料用トウモロコシ、KD730、60本 m^{-2})。クリーニング作物を栽培せず直接湛水除塩を行なった対象区と比較して、栽培区では無機態窒素溶脱量を85~96%削減できた。また、本研究の条件下では水分が多い条件 ($pF=1.5 \pm 0.2$) が NO_3^- 溶脱抑制、 N_2O 発生抑制、バイオマス生産の観点から適切と判断された。塩類除去機構を検討した結果、窒素、カリウム、リン、塩素の除去にはクリーニング作物による吸収の寄与が、ナトリウムおよび硫黄は湛水による寄与が大きいことが示され、クリーニング作物栽培と湛水の併用により、施設栽培土壌の除塩と地下水汚染抑制を同時に実現可能であることが示された。

2010年(7/14~9/1)と2011年(4/22~6/10)には、高知大学農学部内の施設園芸ハウスに埋設型ライシメータを設置し、群落内でのクリーニング作物(飼料用トウモロコシ、KD731)栽培試験を行うことにより、栽植密度(密植: 110本 m^{-2} 、標準: 55本 m^{-2} 、疎植: 11本 m^{-2})と栽培時期の影響を評価した。その結果、栽培しない対象区と比較して夏季は無機態窒素溶脱量が88%以上、 N_2O 放出量が68%以上削減された。春季の溶脱量は86%以上削減されたのに対して、 N_2O 放出量は栽植密度により差があった(図1)。塩類除去機構に関しては、ポット試験と同様の結果が得られ、春季と夏季という異なる栽培時期において、クリーニング作物栽培と湛水の併用により、施設栽培土壌

の除塩と地下水汚染抑制を同時に実現可能であることが示された。

2011年(8/30~10/18)には、クリーニング作物による窒素吸収ポテンシャルを把握する目的で、土壌中の無機態窒素量が 199mg kg 乾土^{-1} と過剰な条件での栽培試験を行なった。その結果、窒素過剰条件下におけるクリーニング作物の窒素吸収量は $12\sim 17\text{gN m}^{-2}$ 程度が限界であることが明らかになった。

岡山県笠岡湾干拓地内のナス施設栽培農家の実圃場において、2010年(7/26~8/17)と2011年(7/21~8/13)においてナス収穫後にクリーニング作物(飼料用トウモロコシ、

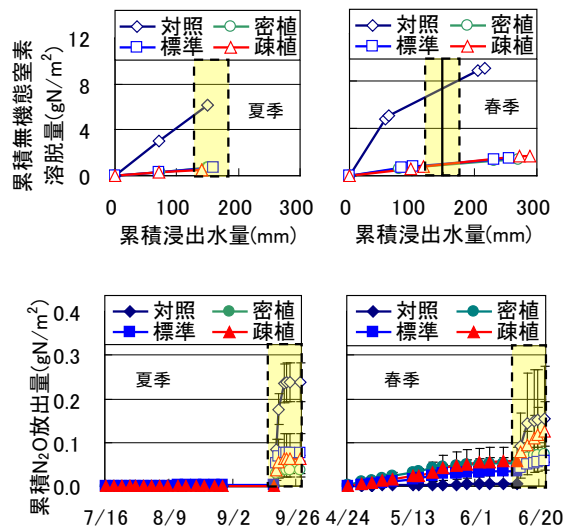


図-1 クリーニング作物の窒素汚染抑制効果の季節比較
注) 誤差線は標準偏差を示す。

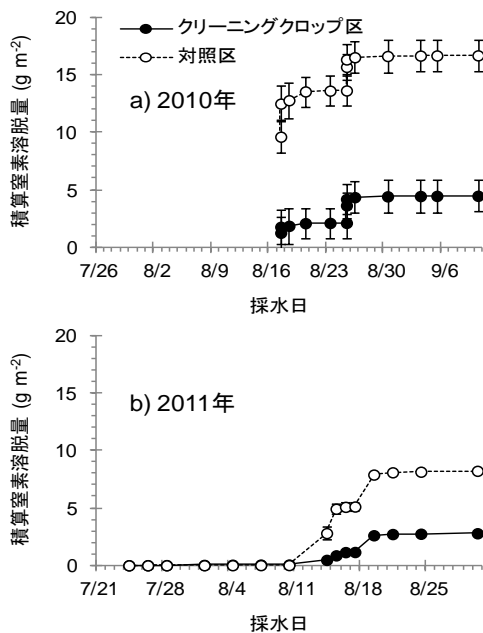


図-2 2010年(a)および2011年(b)のナス休閑期における積算窒素溶脱量
注) 誤差線は標準偏差を示す。

KD730、55本 m^{-2})を栽培し、その後の除塩灌水、土壌還元消毒時における栄養塩溶脱負荷を調査した(2010年は9/10、2011年は8/30まで)。

ナス収穫後から除塩灌水までにクリーニング作物を栽培することにより、窒素溶脱量を2010年には 12.2g m^{-2} (削減率73%)、2011年には 5.4g m^{-2} (同66%)削減できた(図-2)。その効果は兩年とも有意であったが(t -test, $p < 0.05$)、2010年により明確であった。クリーニング作物作付前の作土中無機態窒素含有量を比較すると、2010年の 35.6mg kg^{-1} (6g m^{-2} に相当)に対して、2011年は 3.3mg kg^{-1} (0.6g m^{-2})であった。この差が溶脱量の違いにつながったと考えられる。高知大学におけるポット試験では、クリーニング作物を60日栽培することによって、窒素溶脱量を対照区と比較して85~96%低減できた。栽培条件が異なるものの、本試験での栽培期間は約3週間であった。このことが、削減率の違いに繋がった可能性がある。

(2) ポリ乳酸を用いた地下水硝酸性窒素の原位除去法の検討

地下水の硝酸性窒素除去対策として、水素供与体を含む透過性浄化壁を用いた浄化が有効とされる。しかし一方で、水素供与体として用いる有機物由来の有機態炭素(TOC)濃度増加が懸念される。本研究では、徐放性有機物であるポリ乳酸に着目し、その溶解特性と脱窒促進効果を調べた。

透過性浄化壁を模したカラム試験を行った。豊浦標準砂充填カラム(高さ75cm、内径2.6cm)にポリ乳酸(分子量:5000あるいは10000)1.5gと活性汚泥50mL(脱窒菌源)を埋設し、実地下水($\text{NO}_3\text{-N } 70\text{mg L}^{-1}$, $\text{TOC } 0.7\text{mg L}^{-1}$)を滞留時間が40ないしは60時間になるように 25°C で通水した。その結果、ポリ乳酸(分子量5000)を水素供与体に用いた場合、流出水のTOC濃度を 3.5mg L^{-1} 程度に抑制できたが、窒素除去率が低く、溶解度の向上に課題が残った。より溶解度の低いポリ乳酸(分子量10000)では、窒素除去率がさらに低かった。

次いで、ポリ乳酸の溶解特性にpH、塩類濃度、温度が及ぼす影響を調査した。各種調整溶液200mLにポリ乳酸0.2g添加し、TOC濃度の経時変化を調べた。その結果、ポリ乳酸の加水分解速度は高pHで上昇し、pH11条件で顕著に増加した。また、高pHの場合には高温、高塩類濃度でさらに溶解度が増した。回分試験として、異なるpHの $\text{NO}_3\text{-N } 60\text{mg L}^{-1}$ 溶液200mLにポリ乳酸0.2gと、脱窒菌源として、水田土壌10gあるいは活性汚泥10mLを加えて 25°C で静置した。脱窒菌数は、水田土壌($4.0 \times 10^3\text{g}^{-1}$) < 活性汚泥($7.9 \times 10^9\text{mL}^{-1}$)であったが、窒素濃度の変化パターンに明確

な差はなかった。2週間後には、水田土壌 pH10 条件で最も $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が低下した ($18.6 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$)。しかし、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 還元酵素の働きが一部阻害され、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が $12.6 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ にまで上昇した。ポリ乳酸の加水分解がより進行すると考えられる pH11 条件では、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が $20.4 \pm 2.1 \text{ mg L}^{-1}$ でさらに高かった。

以上のように、ポリ乳酸の加水分解は高 pH で促進されるものの、高 pH では亜硝酸の還元が阻害され、亜硝酸濃度が上昇する場合がある。ポリ乳酸による地下水硝酸汚染の原位置浄化においては脱窒に適した pH 範囲での溶解度の制御が今後の課題である。

(3) 作物収穫物の糖化・L-乳酸発酵プロセスの開発

クリーニング作物（非可食部）をエタノール発酵や乳酸発酵するには、前処理を含む酵素糖化を行い、得られた単糖を発酵させるプロセスが一般的である。ここでは、クリーニング作物として飼料用トウモロコシ (KD730) を採用し、60 日間栽培されたトウモロコシの茎・葉（以下、バイオマス）を用いて、前処理を含む酵素糖化および乳酸発酵を検討した。乳酸発酵では、単糖の資化範囲の広い *Bacillus coagulans* による高温 L-乳酸発酵を採用した。

①組成分析

バイオマスの多糖組成を NREL（米国再生可能エネルギー研究所）プロトコルに基づき測定した（セルロース：24.8%、ヘミセルロース：14.9%）。また、同様の方法で成熟バイオマス（飼料用トウモロコシ, KD375）を測定した（セルロース：38.5%、ヘミセルロース：25.0%）。成熟バイオマスの数値は文献値と近かったことから、栽培期間の短いクリーニング作物はバイオマス重量に対して多糖割合が小さい可能性が示された。

②酵素糖化の前処理

破碎後の粒度のメディアン値が $545 \mu\text{m}$ となったバイオマスを用いて酵素糖化の前処理を行った。既報に従い、アルカリ処理（水酸化ナトリウム、アンモニア）、アルカリ/過酸化水素処理（以下、A/O 処理）、塩酸処理、水熱処理を検討した。その結果、A/O 処理（およびその後の酵素糖化）によりグルコース回収率 89%（対セルロースあたり）、単糖回収率 73%（対ホロセルロースあたり）を得た。グルコース回収率は草本系バイオマス糖化における文献値・目標値付近であり、十分な前処理効果を得た。一方で、同様の前処理を稲わらに対して施した結果、グルコース回収率は 61%と文献値を下回る結果となった。グルコース回収率（あるいは単糖回収率）はバイオマス粒度、酵素糖化条件が関わるが、ある一定の条件で実施した場合に稲わらでは得

られなかったものの、クリーニング作物において十分な糖化効率を得られたことから、クリーニング作物は糖化が易しい可能性を示せた。

③高温 L-乳酸発酵

A/O 処理および酵素糖化によりバイオマスから得た単糖を用いて高温 L-乳酸発酵を実施した。グルコース 17.4 g L^{-1} 、キシロース 3.9 g L^{-1} の糖化液に対して 4 日間の乳酸発酵を施した結果、 18.7 g L^{-1} の L-乳酸を得た。単糖あたりの L-乳酸収率として 0.88、前処理前のバイオマス乾重あたりの L-乳酸収率として 0.26 を得た。高温 L-乳酸発酵のバイオマス由来単糖に対する高い L-乳酸収率が示された。また、高温 L-乳酸発酵は単糖の資化範囲が広く、バイオマス由来の糖（ヘキソース、ペントース）も問題なく発酵できることを確認した。

(4) クリーニング作物収穫物からのリン回収プロセスの開発

研究開始当初は、糖化・L-乳酸発酵プロセスの残渣および溶液からの窒素・リン回収プロセスを検討したが、バイオマス発酵過程での窒素不足が明らかとなったため、回収対象をリンに限定した。

バイオマスとして、成熟した飼料用トウモロコシ (KD375) を部位別に分け、乾燥後に家庭用ミルで粉碎したものを実験に使用した。

粉碎バイオマスを蒸留水に浸し、24 時間後にろ過を行った。ろ液のリン濃度から、24 時間で水中に抽出されたリン量を測定した。

測定結果を図-3 に示す。皮（包葉）からはほぼ全量が蒸留水中に抽出されていた。包葉ほどではないものの、実、葉、茎からも 74~88% のリンが抽出された。穂軸（実の茎の部分）は、他の部位に比べ抽出率が低く 55% にとどまった。ただ、全体で見れば総じて抽出率は高く、バイオマス全体からの平均抽出率は 83% に達した。

次に、抽出後の液にカルシウムを添加し、リンを沈殿させ、水と分離することを試みた。リンはカルシウムと容易に結合する性質があるためである。

沈殿生成の状況を図-4 に、葉からの抽出液にカルシウムを添加した際の、添加前と添加後のリン濃度の変化を図-5 に示す。リン濃度は大きく減少し、減少率は 96% であった。ほぼ全てのリンが沈殿として除去されていたことになる。茎と実の抽出液についても同様の実験を行った。リン濃度の減少率は各々 94%、97% と、葉と同様に高い率であった。

以上のように、トウモロコシの乾燥物を粉碎し、蒸留水に 24 時間浸すだけでトウモロコシに含まれていたリンの 83% を抽出でき、ここにカルシウムを添加することで抽出さ

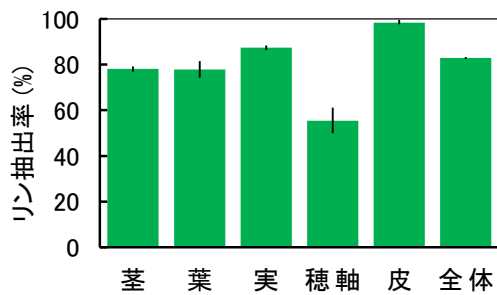


図-3 トウモロコシからの部位別リン抽出率 (20℃、溶媒：蒸留水)
注) 誤差線は最大値/最小値を示す。

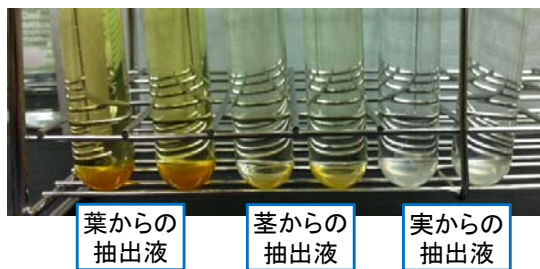


図-4 沈殿生成の状況

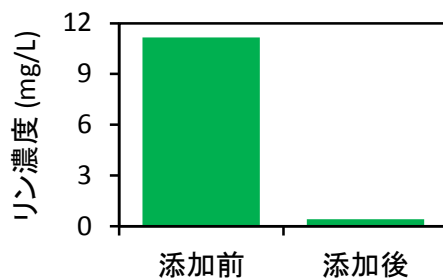


図-5 カルシウム添加による抽出液中リン濃度の変化 (部位：葉)

れたリンの 90%以上が沈殿として分離された。バイオマス中リンを資源としてとらえ、回収する技術は国内外でも検討例がない。リン資源の枯渇が懸念されている一方、一部の畑地土壌には過剰なリンが蓄積されている。今回開発した技術は、過剰なリンを回収し、必要な場所に再配分する上で重要・不可欠な技術である。

(5)まとめと今後の展望

クリーニング作物栽培と湛水の併用により、施設栽培土壌の除塩と地下水汚染抑制を同時に実現可能であることを、高知および岡山という気候・土壌が異なる2地域を対象とした栽培実験に基づき明らかにした。収穫したクリーニング作物は乾重に対する多糖割合が小さいものの糖化が易しい可能性が示された。また、高温 L-乳酸発酵は単糖の資化

範囲が広く、バイオマス由来の糖 (ヘキソース、ペントース) も問題なく発酵できることを確認した。さらに、収穫物を粉碎後に水に浸し、カルシウムを添加することで、バイオマス中リンの 80%程度を回収できた。以上より、提案システムによる地下水硝酸汚染抑制と資源循環が可能であることを示した。

今後は、栽培期間の短縮化および収穫物高付加価値化による本技術の実社会への適用性の向上が課題になる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① S. Akao, K. Maeda, S. Nakatani, Y. Hosoi, H. Nagare, M. Maeda, T. Fujiwara, Comparison of Simultaneous and Separate Processes: Saccharification and Thermophilic L-Lactate Fermentation of Catch Crop and Aquatic Plant Biomass, Environmental Technology, 査読有, 2012, 印刷中
- ② 前田光太郎, 赤尾聡史, 細井由彦, 永禮英明, 前田守弘, 藤原拓, ソフトバイオマスを原料とした酵素糖化における各種前処理の糖化効率比較、土木学会論文集 G (環境)、査読有、67 巻、2011、III_433-III_440
- ③ 永禮英明, 藤原拓, 赤尾聡史, 前田守弘, 山根信三, 回収・再資源化を目的としたバイオマスからの元素抽出、土木学会論文集 G (環境)、査読有、67 巻、2011、III_461-III_466
- ④ 井上賢大, 近藤圭介, 藤原拓, 前田守弘, 高岡昌輝, 大年邦雄, 山根信三, 永禮英明, 赤尾聡史, クリーニングクローブ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、環境工学研究論文集、47 巻、2010、pp. 273-279
- ⑤ 永禮英明, 井上司, 藤原拓, 赤尾聡史, 前田守弘, 山根信三, トウモロコシからのリン抽出方法の検討、環境工学研究論文集、47 巻、2010、pp. 459-464

[学会発表] (計 15 件)

- ① Taku Fujiwara, Catch Crop Cultivation for Diffuse Agricultural Pollution Control and Resource Recovery, The 4th CESE Conference, 26, September 2011, Tainan City, Taiwan.
- ② 前田守弘, 有機物施用畑における窒素循環と硝酸性窒素の溶脱、日本土壤肥料学会 2011 年度つくば大会シンポジウム—家畜排せつ物の利活用と水質問題から

- 考える有機物管理の次世代パラダイム
ー、日本土壌肥料学会、2011年8月10日、つくば市
- ③ 松本智也、原位置脱窒の水素供与体として用いるポリ乳酸の溶解特性に関する基礎実験、日本土壌肥料学会、2011年8月10日、つくば市
- ④ S. Akao, Comparison of Simultaneous and Separate Process : Saccharification and Thermophilic L-Lactate Fermentation of Catch Crop and Aquatic Plant Biomass, 8th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 22 June 2011, Izmir, Turkey.
- ⑤ H. Nagare, Nutrient Recovery from Biomass Cultivated as Catch Crop for Removing Accumulated Fertilizer in Farm Soil, 8th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 22 June 2011, Izmir, Turkey.
- ⑥ K. Kondo, Reduction of Nitrate Leaching from Greenhouse Soil by Catch Crop Cultivation: Effect of Soil Water Content, 8th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 22 June 2011, Izmir, Turkey.
- ⑦ 近藤圭介、ライシメーターでの短期栽培によるクリーニングクロップの土壌浄化効果の評価、第45回日本水環境学会年会、2011年3月18日、札幌市
- ⑧ 藤原拓、クリーニングクロップ栽培によるハウス土壌の面的浄化効果の評価、第45回日本水環境学会年会、2011年3月18日、札幌市
- ⑨ 松本智也、溶解性の異なる有機物を添加した砂カラムによる地下水の硝酸性窒素除去、第47回環境工学研究フォーラム、2010年11月13日、高知市
- ⑩ S. Akao, Simultaneous Saccharification and L-Lactate Fermentation of an Aquatic Plant (*Trapa*) under Unsterile Condition by *Bacillus coagulans*, IWA World Water Congress & Exhibition, 2010年9月20日、モントリオール (カナダ)
- ⑪ 井上賢大、クリーニング作物によるハウス土壌の面的浄化と収穫物資源化を目指した組成解析、第13回日本水環境学会シンポジウム、2010年9月8日、京都市
- ⑫ 井上賢大、クリーニングクロップ栽培時のpFが窒素溶脱および亜酸化窒素放出

に及ぼす影響、平成22年度農業農村工学会、2010年9月2日、神戸市

- ⑬ 藤原拓、ハウス土壌集積窒素の植物浄化におけるpFの影響、第44回日本水環境学会、2010年3月15日、福岡大学七隈キャンパス
- ⑭ 永禮英明、資源回収を目的とした植物中窒素・リン抽出方法の検討、第44回日本水環境学会、2010年3月15日、福岡大学七隈キャンパス
- ⑮ 前田守弘、畑地における有機物施用と窒素環境負荷 (招待講演)、第28回土水研究会ー温暖化緩和策と土・水圏の物質循環研究の接点、2010年2月23日、つくば市

[図書] (計 1件)

- ① 藤原拓、永禮英明、前田守弘、赤尾聡史、シーエムシー出版、植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術ー地球を救う超環境適合・自然調和型システムー第1章3節「クリーニングクロップによるハウス土壌の面的浄化と収穫物資源化」、2011、21-30

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 拓 (FUJIWARA TAKU)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号：10314981

(2) 研究分担者

大年 邦雄 (OHTOSHI KUNIO)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号：00127060
前田 守弘 (MAEDA MORIHIRO)
岡山大学・環境学研究科・准教授
研究者番号：00355546
赤尾 聡史 (AKAO SATOSHI)
鳥取大学・工学研究科・助教
研究者番号：30448196
永禮 英明 (NAGARE HIDEAKI)
岡山大学・環境学研究科・准教授
研究者番号：60359776

(3) 連携研究者

なし