

炭素貯留を実現する水処理と肥料化技術の開発(その2)

横山 茂輝 松澤 大起
倉澤 響 袋 昭太

概 要

2050年までの脱炭素社会の実現には、CDR(大気中二酸化炭素の直接除去技術)の実現が必要不可欠である。バイオ炭の農業利用は、大気中のCO₂を低コストかつ十分な規模で行えるCDR技術の一つであり、その炭素貯留ポテンシャルは最大2GtCO₂/年と世界全体の約6%に相当すると試算されている。我が国においてもJ-クレジットの方法論として整備されるなど、バイオ炭の利用は一層の拡大が期待されている。筆者らは、木質ガス化発電にて副生するバイオ炭(以降、副生バイオ炭)をカスケード利用することで炭素貯留可能なシステムの構築に取り組んできた。前報では、副生バイオ炭からリン吸着材(以降、プライムカーボン)を作成し、リン酸調製溶液を対象とした吸着特性について明らかとした。また、リン吸着後のプライムカーボン(以降、リン吸着後炭)について、緩効性のりん酸肥料成分を含むことや、コマツナ栽培試験においても植害を生じないことを報告した。

本報では、実排水での効果検証を目的とし、下水処理施設にリン回収装置を設置し、プライムカーボンによる中長期的なリン除去特性を解析するとともに、リン吸着後炭を用いて水稻の栽培試験を実施した。この結果、60日以上連続的なリン回収効果を確認し、水稻栽培試験では化成肥料と比較して遜色ない生育がみられた。

Development of water treatment and fertilizer technology to realize carbon storage (Part 2)

Abstract

In order to achieve a decarbonized society by 2050, it is essential to realize CDR (technology for direct removal of carbon dioxide from the atmosphere). Agricultural use of biochar is one of the CDR technologies that can remove CO₂ from the atmosphere at a low cost and on a sufficient scale. The use of biochar is expected to further expand in Japan as well, such as being developed as a J-credit methodology. The authors have been working on building a system that can store carbon by cascading the biochar that is a by-product of wood gasification power generation (by-product biochar). In the previous report, we created a phosphorus adsorbent (PRIME-Carbon) from by-product biochar and clarified its adsorption properties for a phosphoric acid-adjusted solution. In addition, we reported that PRIME-Carbon after phosphorus adsorption (charcoal after phosphorus adsorption) contains a slow-release phosphate fertilizer component and that it does not cause vegetation damage in Komatsuna cultivation tests.

In this report, for the purpose of verifying the effects in actual wastewater, a phosphorus recovery device was installed in a sewage treatment facility, and a medium- to long-term phosphorus recovery test using PRIME-Carbon was conducted. As a result, we confirmed the continuous phosphorus recovery effect for more than 60 days, and in the paddy rice cultivation test, growth was comparable to that observed with chemical fertilizers.

キーワード: 炭素貯留、バイオマス、バイオ炭、吸着材、リン回収、堆肥、肥料

§1. はじめに

1.1 背景・目的

我が国は IPCC「1.5°C特別報告書」¹⁾を受け、2050 年までに温室効果ガス排出実質ゼロを目指すことを宣言した。また、「革新的環境イノベーション戦略」では、農地土壌へのバイオ炭の投入は大気中の CO₂を土壌に隔離・貯留する方法として期待されており、世界全体での炭素貯留ポテンシャルは最大 2GtCO₂と試算²⁾されている。

他方、木質バイオマスガス化発電は蒸気タービン発電方式と比較して小規模でも高い発電効率が得られるため、地域の分散型電源として期待されるが、熱需要確保と副生バイオ炭の処分が課題となっている。また、我が国は農業生産に必須のリンを全量輸入に依存しているため、地域におけるリン資源の循環利用が求められている。

そこで、筆者らは、ガス化発電で発生する副生バイオ炭をカスケード利用することで炭素貯留可能なシステムの構築を目指した取り組みを行っている。具体的には、副生バイオ炭からリン吸着材プライムカーボン³⁾を製造し、下水等の排水中から水質汚濁要因物質であるリンを除去回収し、リン吸着後炭として農地に施用する。これにより、事業全体の経済性を向上させるとともに、未利用リン資源の活用と農地への炭素貯留等による温室効果ガス排出量の大幅な削減が期待できる。

前報³⁾では、プライムカーボンは既知のリン吸着材と比較して遜色ないリン吸着特性を示し、リン吸着後炭は緩効性の肥料として利用できる可能性があることを報告した。

本報では、A 市の下水処理施設にリン回収試験装置を設置し、実排水を対象としたプライムカーボンのリン吸着特性と、得られたリン吸着後炭の水稻への肥効について検証した結果を報告する。

§2. 試験材料および方法

2.1 リン吸着材

木質ガス化発電の副生バイオ炭を原料に弊社独自の技術で鉄を含有させて製造したリン吸着材(プライムカーボン)を供試試料とした。外観を写真 1 に示す。有機炭素を 40~60 %、鉄を約 10 %含有している、長さ 4~10 mm 程度の円柱状のペレットである。



写真 1 プライムカーボン

2.2 リン回収試験

(1) 処理対象水

リン回収の処理対象水はA市下水処理施設の汚泥分離液処理施設処理水(以降、原水)とし、分離液処理施設最終沈殿池から採取した。採取フローを図1に示す。

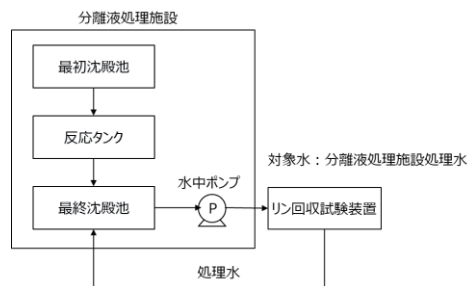


図1 リン回収処理対象水の採取フロー

(2) リン回収試験装置

装置は、原水貯留槽、流量調整槽、吸着材充填槽、処理水貯留槽および吸着材充填槽の水切り場にて構成した。装置の外観、仕様をそれぞれ写真2、表1に示す。

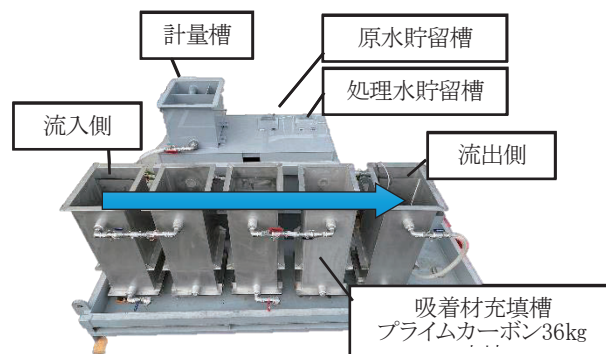


写真2 リン回収試験装置

表1 仕様

試験装置全体	全長L	mm	3,440
	全幅W	mm	1,668
	全高H	mm	2,056
	総重量	kg	1,290
吸着材充填槽	全長L	mm	470
	全幅W	mm	436
	全高H	mm	1,146
	容積	L	149
原水貯留槽			930
処理水貯留槽	容積	L	308
計量槽			80
処理水量	設定	L/h	48

(3) リン回収処理フロー

リン回収試験の処理フローを図2に示す。原水は原水貯留槽からポンプにて計量槽に送られ、そこで流量調整された水量が吸着材充填槽①へ送られる。その後、吸着材充填槽①から⑤を通過して処理水貯留槽まで自然流下させた。処理水は分離液処理施設最終沈殿池にポンプで返送した。

吸着材充填槽は7日毎に流出側の槽を取り外してリン吸着後炭を回収し、流入側に新しい槽を追加することでプライムカーボンを交換した。

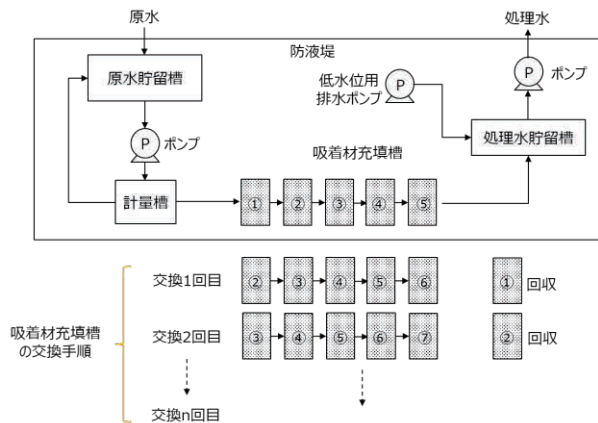


図2 リン回収処理フロー

(4) 試験条件

原水を流量1.1 m³/日、吸着材充填槽あたりの滞留時間1.7h、充填槽あたりの線速度0.4 m/hとして、リン回収試験装置に63日間通水した。また、回収したリン吸着後炭の一部を回収し、別の充填槽を用いて21日間追加通水した。

プライムカーボンは、吸着剤充填槽1槽あたり乾燥重量として36 kg充填した。

(5) 分析

原水および処理水の全リン、リン酸態リン、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、pHをJIS K 0102⁹⁾に準じて測定した。また、リン吸着後炭のりん酸(P₂O₅)含有量は肥料等試験法⁹⁾に準じて分析した。

2.3 リン吸着後炭の水稻栽培試験

(1) 供試資材

本試験で用いたリン吸着後炭は、2.2試験とは別にラボにてカラム(内径100mm×高さ1,000mm)にプライムカーボンを充填し、2.2試験における原水を2週間通水し、風乾して調製した。副生バイオ炭は稼働中のガス化発電施設より入手した。堆肥は東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター(以下、東北大学)内で製造した牛糞堆肥を使用した。肥料等試験法⁹⁾に準じて分析した

供試資材の成分組成を表2に示す。なお、リン吸着後炭は田植え時期の関係で予定より通水期間(吸着期間)を短縮して調製した。

表2 供試資材の組成(現物あたり%)

	全炭素 C%	全窒素 N%	全リン酸 P ₂ O ₅ %	全カリウム K ₂ O%	水分 %
リン吸着後炭	24.1	0.11	0.41	0.3	30.0
副生バイオ炭	86.7	0.15	0.26	2.8	1.2
牛ふん堆肥	17.5	0.99	0.87	1.6	55.9

(2) 試験条件

東北大学の非アロフェン質黒ボク土水田に設置した27.5cm×27.5cmの試験枠内へ各資材を施用し、水稻(品種:ひとめぼれ)を栽培した。試験区は(1)リン吸着後炭区(P炭)、(2)リン吸着後炭+堆肥区(P炭+堆)、(3)副生バイオ炭単独炭区(炭)、(4)副生バイオ炭+堆肥区(炭+堆)、(5)堆肥単独区(堆)、(6)慣行区(慣行)の6つとした。慣行区は資材を施用せずに化学肥料のみを慣行量施用し、N-P₂O₅-K₂O:7-7-7とした。リン吸着後炭、未処理炭の施用量は現物で500 g/m²、牛ふん堆肥の施用量も現物で500g/m²とした。慣行区を除く試験区での化学肥料の施用量はN-P₂O₅-K₂O:7-5-7とした。試験は5反復で実施し、1週間に1回チャンバー法でガスを採取し、メタンフラックスを求めた。試験区の施肥量を表3に、田植え後およびチャンバー法でのガス採取の状況を写真3および4に示す。

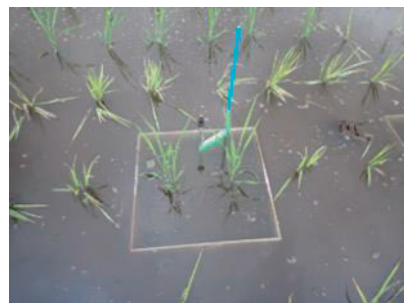


写真3 田植え後



写真4 チャンバー法

表3 施肥量

処理区名	略称	資材施用量		化学肥料施用量			総成分投入量			
		g現物量/m ²		g成分/m ²			g成分/m ²			
		炭資材	堆肥	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	TC	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
リン吸着炭単独区	P炭	500	-	7	5	7	121	7.5	7.1	8.3
リン吸着炭・堆肥区	P炭+堆	500	500	7	5	7	208	12.5	11.4	16.3
副生バイオ炭単独区	炭	500	-	7	5	7	434	7.8	6.3	20.9
副生バイオ炭+堆肥区	炭+堆	500	500	7	5	7	521	12.7	10.7	28.9
堆肥単独区	堆	-	500	7	5	7	87	12.0	9.4	15.0
慣行区	慣行	-	-	7	7	7	0	7.0	7.0	7.0

§3. 試験結果

3.1 リン回収試験

(1) リン吸着性能

試験結果の概要を表4、原水および処理水における全リンおよびリン酸態リンの推移を図3に示す。全リン(TP)の推移は、原水では30 mg/L程度であったが、試験経過21日目から35日目の期間は雨水の流入等によって11 mg/Lまで低下し、平均で26 mg/Lとなった。一方、処理水では経時変化は小さく、平均で5 mg/Lとなった。原水と処理水の全リン濃度の差分から求めた除去率は平均で78%となり、安定的な除去が可能と考えられた。また、処理水中の全リンの大半はリン酸態リン(PO₄-P)だったことから、除去されたリンは懸濁態として流出せずにプライムカーボンにより回収されたことが示された。

なお、既存規格にある副産肥料に該当するのであれば、りん酸(P₂O₅)含有量1%以上が必要となる。上記で得られたリン吸着後炭の含有量は乾燥重量あたり0.84%であったが、原水の追加通水7日で1.06%、14日で1.21%、21日で1.48%に増加したため、通水条件の選定等により、リン吸着後炭は副産肥料として使用できる可能性が示唆された。

表4 リン回収試験結果概要

試験期間		‘21年7~9月	
試験期間中のリン除去率	%	78	
プライムカーボン滞留日数	日	35	
リン吸着後炭の	通水35日	%	0.84
りん酸(P ₂ O ₅)含有量*	追加通水21日	%	1.48

*乾燥重量あたり

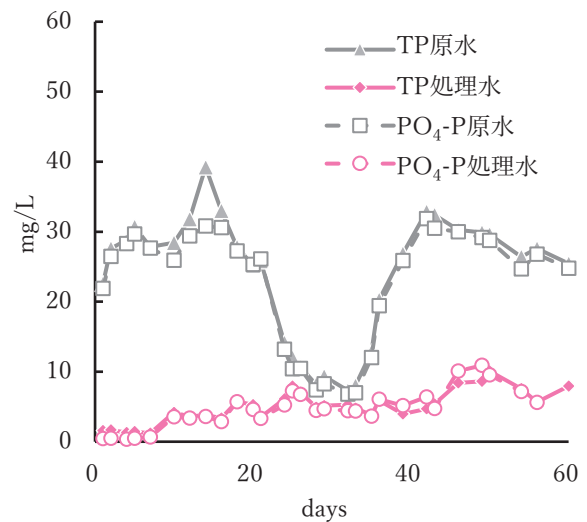


図3 原水および処理水のリン濃度推移

(2) その他の水質項目

原水および処理水におけるpHの推移を図4、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素の推移を図5に示す。

pHは、原水では平均6.8であったのに対し、処理水では8.3となり、未反応のプライムカーボンを追加した直後にpHが上昇する傾向がみられた。全窒素は、原水の平均29.0 mg/Lに対して処理水では平均21.3 mg/Lとなり、除去率は27%だった。硝酸態窒素は、原水の平均7.2 mg/Lに対して処理水では平均2.3 mg/Lとなり、除去率は68%だった。一方、亜硝酸態窒素は原水の平均0.7 mg/Lに対して処理水では平均3.4 mg/Lと増加した。また、アンモニア態窒素は原水と比較し、ほとんど変動が見られなかった。全窒素の一部はプライムカーボン内部が局所的に嫌氣的になることで、脱窒反応により減少したと考えられた。

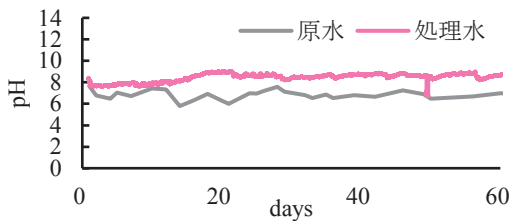


図4 原水および処理水のpH推移

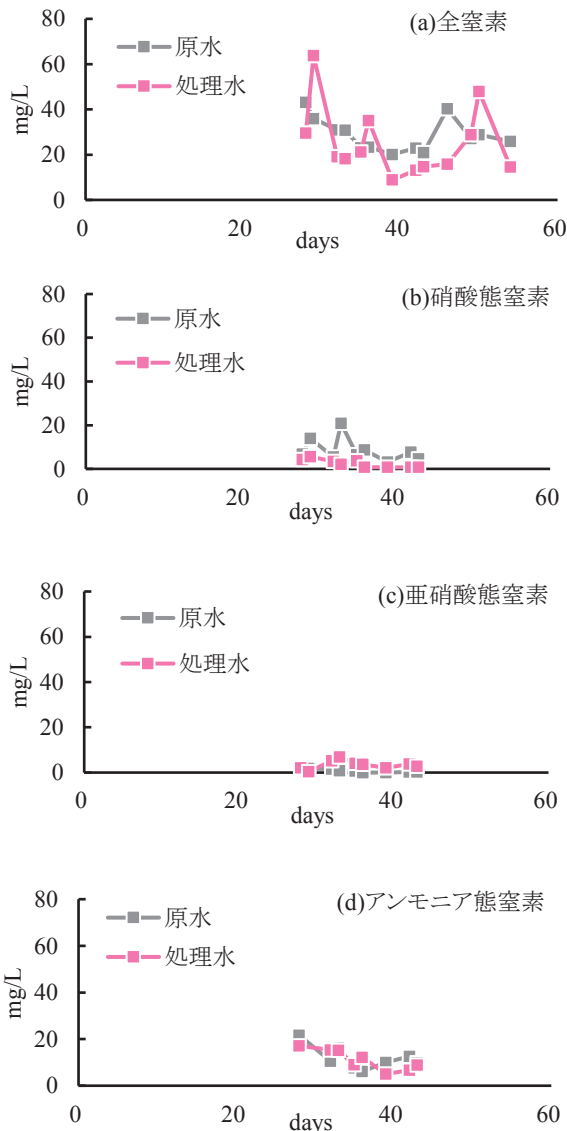


図5 原水および処理水の各態窒素濃度推移

3.2 リン吸着後炭の水稲栽培試験

水稲の草丈および茎数の推移、メタンフラックスを図6～図8、米の収量を表5、収穫後土壌の有機炭素含有率を図9、遊離酸化鉄を図10に示す。稲の生育は各処理区間で明確な違いは見られず、資材による特段の生育阻害は認められなかった。米の収量についても資材の影響は特に認められなかった。メタンフラックスは、牛ふん堆肥区でやや高め

に推移する傾向はあったが、栽培期間中の積算放出量は慣行区を含めて処理間で有意差は認められなかった。これにより、リン吸着後炭の施用で炭素投入量が増加しても、水田からのメタンの放出は増加しないことが示唆された。

収穫後土壌の有機炭素含有率は処理区間で有意差が認められなかったが、リン吸着後炭および副生バイオ炭を施用した処理区で炭素が増加する傾向がみられた。また、土壌中鉄分の指標である遊離酸化鉄はリン吸着後炭を施用した処理区で増加傾向であった。

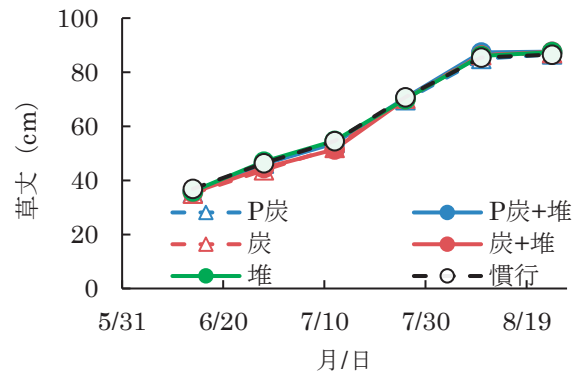


図6 草丈の推移

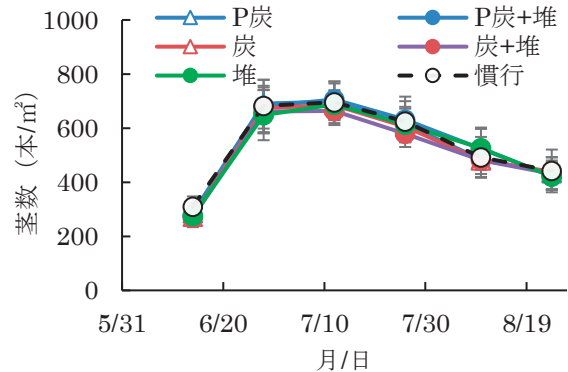


図7 茎数の推移

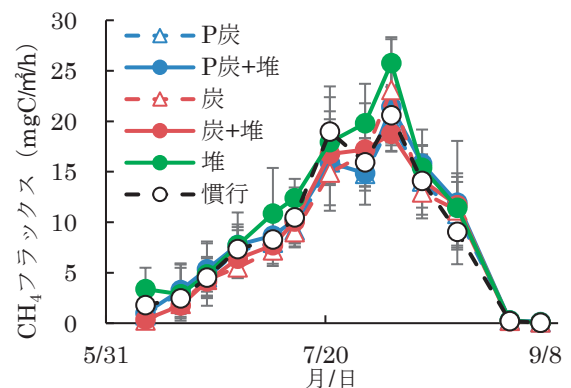


図8 メタンフラックス

表5 米の収量

処理区名	精玄米量 (g/m ²)	穂数 (本/m ²)	1穂粒数 (粒)	総粒数 (千粒/m ²)	精玄米歩合 (%)	千粒重 (g)
P炭	508	423	63.8	26.9	85.0	22.2
P炭+堆	496	428	64.8	27.7	83.1	21.6
炭	496	439	61.4	26.9	84.3	21.9
炭+堆	494	423	64.2	27.1	84.1	21.8
堆	522	418	66.3	27.7	86.1	22.0
慣行	479	439	64.5	28.2	81.0	21.2
ANOVA	NS	NS	NS	NS	NS	NS

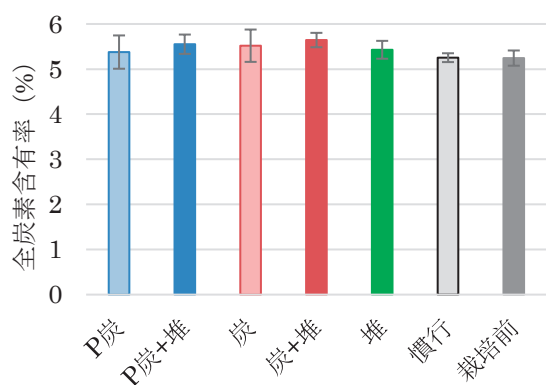


図9 収穫後土壌の有機炭素含有率

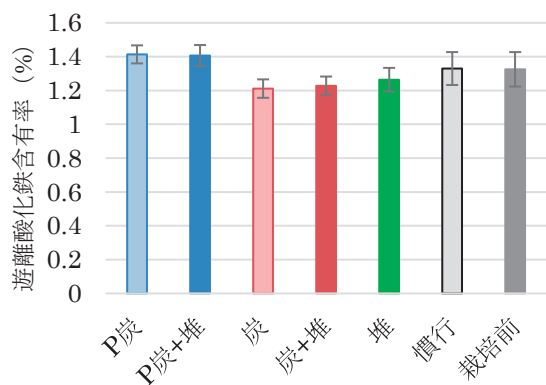


図10 収穫後土壌の遊離酸化鉄含有率

§4. まとめ

木質ガス化発電の副生バイオ炭を原料に製造したプライムカーボンの下水処理への適用と、回収したリン吸着後炭の肥料化について、以下の知見を得た。

- 1) リン回収試験では、下水処理施設の実排水を用い、60日間以上の安定的なリン除去効果が示された。また、リン吸着後炭について、1週間の追加通水でりん酸含有量が1%以上となり、副産肥料としての有用性が示唆された。

- 2) 水稻栽培試験では、リン吸着後炭の稲の生育は他の処理区と同程度であり、生育の阻害は見られなかった。また、メタンの排出量も有意な差が認められなかった。一方、リン吸着後炭を施用した処理区の土壌中炭素および遊離酸化鉄は有意差が認められなかったものの、増加する傾向がみられた。

今後は、自治体での実証を通じて、リン吸着能力のさらなる向上を図るとともに、リン吸着後炭の肥料登録を行うなど、実用化・商品化に向けた取り組みを進めて行く予定である。

謝辞

本研究に際し、東北大学様には多大なご協力を得ました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC(2018),Global Warming of 1.5°C
- 2) 岸本(莫)文紅, 地球温暖化防止の土壌炭素隔離機能から見たバイオ炭,木質炭化学会誌,15(1), 2-7,2018
- 3) 横山茂輝,倉澤響,袋昭太, 炭素貯留を実現する水処理と肥料化技術の開発(その1),フジタ技術研究報告,第55号,pp 69-72,2019
- 4) 日本産業規格(2020), JIS K 0102:2016 工場排水試験方法
- 5) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター,肥料等試験法(2021)

ひとこと

脱炭素社会の実現は、誰もが取り組まなければならない地球規模の課題です。

本研究を通じて、炭素を地中に貯留する技術の実用化を目指して取り組んでまいります。



横山 茂輝