

炭素貯留を実現する水処理と肥料化技術の開発（その3）

尾崎 洋輔	横山 茂輝
松澤 大起	倉澤 響
中村 慎	村上 陽一郎
倉谷 直樹	袋 昭太 [※]

概 要

近年、気候変動や国際情勢の緊迫化により、食料安全保障の強化が我が国にとって喫緊の課題となっている。特に、持続可能な食料生産のためには、肥料原料のほとんどを輸入に頼っている現状から国内資源の活用への転換が強く求められている。とりわけ枯渇性資源であるリンについては国内の年間需要量が約30万トンであるのに対して、その約2割にあたる約5万トンが下水汚泥に含まれていることから、国は2030年までに堆肥や下水汚泥資源の使用量を倍増し肥料中の国内資源利用割合（リンベース）を40%に拡大するという目標を掲げている。筆者らは、木質バイオマス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下水汚泥の脱水ろ液からのリン回収とバイオ炭による炭素貯留を同時に実現する複合技術の開発に取り組んでいる。本報では、改良を加えたプライムカーボン[®]とリン回収装置による、概念実証事業について検証した。具体的には、リン回収試験を計4回実施し、平均全リン除去率69%と安定的なリン回収がなされていることを確認した。また、プライム肥料[®]やプライム堆肥[®]を用いた栽培試験において、化成肥料や通常の堆肥を用いた試験区に比べ、同等以上の収量性を示す結果を得た。

Development of water treatment and fertilizer technology to achieve carbon storage (Part 3)

Abstract

With climate change and heightened international tensions, enhancing food security has become an urgent issue for Japan. Particularly, since Japan relies on imports for most chemical fertilizer materials, a shift toward the use of domestic fertilizer resources is strongly required to achieve sustainable food production. Regarding phosphorus, a depletable resource, approximately 50,000 tons, about 20% of Japan's annual demand of roughly 300,000 tons, is contained in sewage sludge. In response, the government has set a target to double the use of compost and sewage sludge resources by 2030 and to increase the proportion of domestic resources (on a phosphorus basis) in fertilizers to 40%.

The authors are developing an integrated technology that enables both phosphorus recovery from sewage sludge dewatering filtrate and carbon storage through biochar, by cascading the use of biochar byproduct generated from woody biomass gasification power plants.

This paper reports on a proof-of-concept project using an improved PRIME-Carbon[®] and phosphorus recovery system. Specifically, four phosphorus recovery tests were conducted, confirming stable recovery with an average total phosphorus removal rate of 69%. In addition, cultivation tests using PRIME Fertilizer[®] and PRIME Compost[®] demonstrated yields equal to or greater than those obtained with chemical fertilizers and ordinary compost.

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

※ 経営改革統括部

§1. はじめに

昨今の気候変動や世界情勢の緊迫化の背景を踏まえ、食料の安全保障の強化が国家の喫緊かつ重要な課題となっている。日本では肥料原料の大半を輸入に依存していることから、持続可能な食糧生産のために国内資源への代替転換が強く求められている。特に下水汚泥には枯渇性資源であるリンの年間需要量約30万トンに対して、その約2割に相当する約5万トンが含まれることから¹⁾、2030年までに堆肥・下水汚泥資源の使用量を倍増し、肥料の使用量（リンベース）に占める国内資源の利用割合を40%までに拡大する政策目標²⁾が2022年に掲げられたところである。

そこで筆者らは、木質バイオマス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バイオ炭「プライムカーボン[®]」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、リン含有バイオ炭「プライム肥料[®]」として農地に施用する取り組みである。これにより、未利用リン資源の活用と農地への炭素貯留による温室効果ガス排出量の大幅な削減が期待できる。さらに、プライムカーボン[®]は水処理過程で副生炭に含まれるアルカリ成分が洗い流されるため、最終的には中性域に近いプライム肥料[®]が生産される。これは従来高いpHが理由でバイオ炭の農地施用が制限されていたことに対する解決手段を提供することに繋がる。

前報³⁾では、実際の下水処理施設に設置したリン回収装置にプライムカーボン[®]を適用し、60日以上連続的なリン回収を達成したことに加え、回収物であるリン含有バイオ炭（プライム肥料[®]）を水稻栽培に利用することで、化成肥料と遜色のない生育を実証したことを報告した。

本報では、プライムカーボン[®]およびリン回収装置に改良を加えて実施した沖縄県石垣市の下水処理施設における概念実証事業の成果について報告する。具体的には、2022年12月より実施しているリン回収試験の状況に加え、得られたプライム肥料[®]を肥料登録の際の成分評価や作物栽培試験の結果に焦点をあてて報告する。

§2. 試験材料および方法

2.1 リン回収試験

(1) リン吸着バイオ炭（プライムカーボン[®]）

プライムカーボン[®]はリン回収効率を高めるため、

前報から改良を加えたものを用いた。すなわち、木質バイオマスガス化発電副生バイオ炭（粉状炭）を主原料とし、独自の処理にて複数の無機物を含有させ、図1に示す直径約4 mm、長さ約4～10 mmの円柱状の資材「プライムカーボン[®]」を製造し、リン回収試験に用いた（図1）。製品の嵩比重は約0.7 gcm⁻³、蛍光X線分析の定性的な組成としては炭素を40～60%、鉄とマグネシウムをそれぞれ2%、7%程度含有している。



図1 プライムカーボン[®]

(2) リン回収対象水

リン回収試験は沖縄県石垣市にて、2022年12月～2023年10月にかけて、下水水質の季節変動に対しての安定性を確認するため3か月ごとに18～40日間の試験を計4回実施した。リン回収対象水は消化汚泥の脱水ろ液とし、試験期間中の全リンとリン酸態リン濃度の平均はそれぞれ164、162 mgL⁻¹であり、リンの大部分はリン酸態リンで存在していた。なお、全窒素、アンモニア性窒素、全有機炭素濃度の平均はそれぞれ600、450、48 mgL⁻¹であった。

(3) リン回収実証試験

試験装置は、1.7 m×6.0 m×高さ2.4 mの鋼製装置であり、原水貯留槽、砂ろ過装置、砂ろ過処理水槽、反応槽、処理水貯留槽の水移送機構とともに、吸着材ホッパー、投入コンベヤ、排出メッシュコンベヤ、回収用フレコンバッグのプライムカーボン[®]の移送機構および、制御盤と遠隔監視装置から構成される。処理フローについて図2に示す。

下水処理施設から装置の原水貯留槽に送られた汚泥脱水ろ液は、砂ろ過処理された後に反応槽下部の流入口に供給され、リン回収後に反応槽上部から排出される。対象水の滞留時間は1.2時間、線速度は0.75 mh⁻¹の上向流方式の吸着処理である。他方、プライムカーボン[®]は一定間隔で反応槽上部に充填されるとともに反応槽の下部から同量のプライム肥料[®]が排出され、

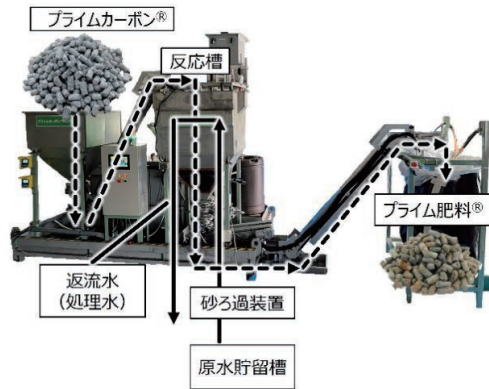


図2 リン回収試験装置の処理フロー

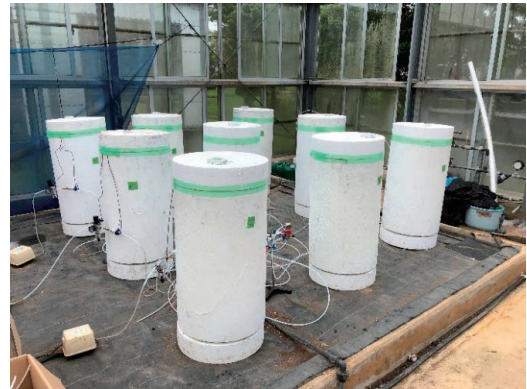


図3 カラム堆肥化試験

水切り後にフレコンバッグへと投入される。すなわち、プライムカーボン®の吸着能の低下とともにより高濃度のリン含有水と接触するクロスフロー方式の処理法である。プライムカーボン®が反応槽に投入されてから排出されるまでの期間は約7日、1日あたり約7 kgのプライム肥料®が生産される。

2.2 リン含有バイオ炭混合堆肥（プライム堆肥®）生産試験

プライム肥料®をリンの単肥として直接農地に施用することもできるが、その際は窒素やカリウムなど他の肥料要素を施用時に補う必要がある。このため、堆肥との混合利用について検討した。

堆肥化の副資材として木炭の添加により家畜糞の発酵を促進することが既報により知られているが⁴⁾、

堆肥材料の適切なpHは7～9の範囲とされている⁵⁾。これに対しバイオ炭のpHは一般的に8～10であり、木質バイオマスガス化発電の場合は高温処理されることから副生炭のpHは9～13と高い値となることも多く、バイオ炭の種類によっては副資材としての投入量に留意が必要である。一方、プライム肥料®のpHは8.5～9.0であるため、添加量に特段の制限は受けない。ただし、堆肥化の発酵促進を目的とした副資材としては必要最小限の投入がコスト等の観点からも望ましい。このため、石垣市での試験では牛糞を対象とした図3に示すカラム堆肥化試験および、1～3 m³規模の堆積堆肥化試験により、プライム堆肥®の最適な生産条件を検討した。

表1 オクラの試験条件

処理区	化学肥料 成分換算投入量			堆肥 現物投入量	
	N（窒素）	P ₂ O ₅ （りん酸）	K ₂ O（カリウム）	堆肥	プライム堆肥®
		kg 10a ⁻¹		t 10a ⁻¹	
化成肥料区	28	28	20	0	0
堆肥区	28	28	20	2.7	0
堆肥－100%減肥区	0	0	0	2.7	0
プライム肥料区	28	28	20	0	0
プライム堆肥区	28	28	20	0	3.0
プライム堆肥－100%減肥区	0	0	0	0	3.0

表2 パッションフルーツの試験条件

処理区	化学肥料 成分換算投入量			堆肥 現物投入量	
	N（窒素）	P ₂ O ₅ （りん酸）	K ₂ O（カリウム）	堆肥	プライム堆肥®
		kg 10a ⁻¹		t 10a ⁻¹	
化成肥料区	20	4.8	6.4	0	0
堆肥区	20	4.8	6.4	3.0	0
プライム堆肥区	20	4.8	6.4	0	3.0

2.3 プライム肥料[®]、プライム堆肥[®]を用いた栽培試験

2.1で得られたプライム肥料[®]や2.2で得られたプライム堆肥[®]を用い、2023年から2024年にかけて沖縄県農業研究センターでポット栽培試験を行った。供試作物はオクラ（品種：フィンガーファイブ）およびパッションフルーツ（品種：サマーキーン）である。オクラについては、化成肥料区、堆肥区、堆肥－100％減肥区、プライム肥料区、プライム堆肥区、プライム堆肥－100％減肥区の6試験区を設け、パッションフルーツについては化成肥料区、堆肥区、プライム堆肥区の3試験区を設けた。供試土壌は現地土壌である国頭マージを用いた。試験区および施肥条件については、表1および表2に示すとおりである。

また、肥料の安全性を示す目的で2023年にフジタ技術センターにて栽培した葉菜類（ハクサイ、キャベツ、レタス）を対象に、CODEX基準で定めのある有害重金属の含量について分析を行った。

§3. 試験結果

3.1 リン回収試験

(1) リン回収実証結果

リン回収実証試験の結果を図4に示す。全リンとリン酸態リンの平均除去率はそれぞれ69％、74％であり、安定的にリン回収がなされていることを確認した。また、リン以外の窒素および、有機物の除去率はそれぞれ11％、32％であり、また、有機物については32％の除去率が得られたのに対して、窒素では11％であり、窒素はほとんど除去されなかったという結果が示された。

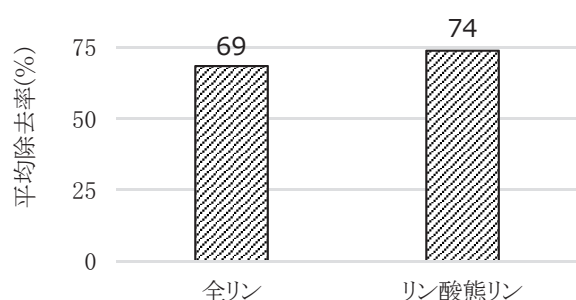


図4 全リンおよびリン酸態リンの平均除去率

(2) 肥料登録

プライム肥料[®]の肥効成分と有害成分をそれぞれ表3に示す。平均りん酸（ P_2O_5 ）含有率は有姿（含水率40～50％）で2.4～2.7％であり、副産肥料の保証成分となる、く溶性りん酸の割合は、りん酸全量に対して約93％～95％と高く、有害成分についても許容値を大きく下回ったことから、緩効性のリン肥料として有用

であることが示された。

また、原料副生炭のpHは高いものでは12以上とアルカリ性を示すが、プライム肥料[®]のpHは8.5～9.0と弱アルカリ性となったことから、従来、土壤改良材としてバイオ炭を施用し難い農地にも適用しやすいと推察される。

なお、プライム肥料[®]は、2024年4月10日付で「プライム肥料1号」という名称で肥料登録が完了した。

表3 回収物における肥効成分と有害成分

項目	単位	測定値	肥料規格
りん酸全量	%	2.45～2.73	－
く溶性りん酸	%	2.32～2.53	1%≦
有機炭素	%	29.0～33.5	－
窒素全量	%	0.49～0.68	－
加里全量	%	0.10～0.16	－
水分	%	40.3～44.1	－

項目	単位	測定値	許容値*
カドミウム	mg kg ⁻¹	N.D.	3
水銀	mg kg ⁻¹	N.D.～0.007	2
ニッケル	mg kg ⁻¹	11～23	200
クロム	mg kg ⁻¹	7～17	2000
鉛	mg kg ⁻¹	N.D.	120
ヒ素	mg kg ⁻¹	0.7～1.1	80

※保証値であるく溶性りん酸2％に基づく許容値を記載

3.2 プライム堆肥[®]の生産試験

試験結果を図5に示す。堆肥化試験の結果、原料（有姿）に対してプライム肥料[®]を5～10％添加することで、腐熟促進効果の指標である易分解性炭素の割合が減少することが確認された。このことから、プライム肥料[®]には牛糞堆肥の腐熟を促進する資材としての効果があることが示された。他方、プライム肥料[®]を15％添加すると易分解性炭素の割合が逆に上昇するような傾向が認められた。これはプライム肥料[®]の添加

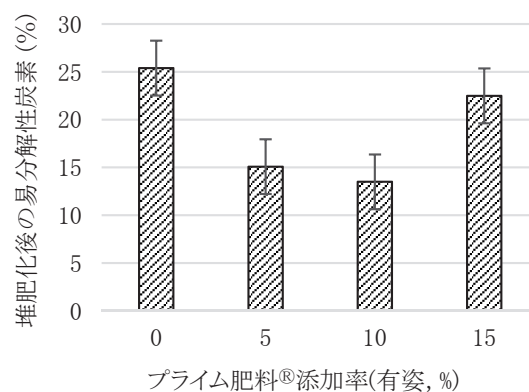


図5 プライム肥料[®]添加の発酵促進効果

割合を増やすにあたり、試験開始時に混和する種堆肥、いわゆる「戻し」の量を減じているため、堆肥化に関与する微生物数の増加が遅れ、堆肥化初期反応が滞ったことなどが要因として考えられる。

実際に、プライム肥料[®]を腐熟促進材として活用して生産された堆肥は、「プライム堆肥1号」の名称で、試験協力を得た堆肥生産者により沖縄県知事へ届出が行われ受理された。

3.3 プライム肥料[®]の栽培試験

フジタ技術センターにて栽培した葉菜類において有害成分の検証を行った結果を表4に示す。プライム肥料[®]栽培区および化成肥料栽培区のいずれの作物においても、有害成分は不検出または食品の許容値を大きく下回る値であった。

次に、オクラおよびパッションフルーツのポット栽培試験の結果を表5および表6に、栽培中の作物の外観を図6に示す。オクラの可販収量に関しては、堆肥100%減肥区において他の試験区と比較して低い傾向が認められた。一方、プライム堆肥[®]100%減肥区では、他の試験区と同等の収量が得られ、プライム堆肥[®]を用いることで化学肥料を使用せずとも収量の低下を招かない可能性が示唆された。パッションフルーツに関しては、統計的な有意差は認められなかったものの、

他の試験区と比較して果実数が多く、着果率も高い傾向が見られた。

これらの栽培試験は、沖縄県特有の気候および土壌条件下で得られた結果であるが、前報で報告した東北大学（宮城県）およびフジタ技術センター（神奈川県）における試験でも同様に良好な結果が得られており、地域や作物に限定されず、全国的に活用可能な肥料であると考えられる。

§4. まとめ

沖縄県石垣市を研究フィールドとし、改良を加えたプライムカーボン[®]とリン回収装置を用いてリン回収事業の概念実証を行い、下記の知見を得た。

- 1) 沖縄県石垣市の浄化センターにて、2022年12月～2023年10月にかけて、3か月ごとに18～40日間のリン回収試験を計4回実施し、平均全リン除去率69%と安定的なリン回収がなされていることを確認し、回収物はプライム肥料1号の名称で肥料登録を完了させた。
- 2) 牛糞を対象としたカラム堆肥化試験により、リン含有バイオ炭混合堆肥（プライム堆肥[®]）の生産条件を検証した。その結果、原料（有姿）に対してプライム肥料[®]を5～10%添加すると、腐熟促進効果の指標である易分解性炭素の割合が減少す

表4 収穫物の有害成分分析結果

試験作物	項目	分析結果 (mg kg ⁻¹)		CODEX基準 (mg kg ⁻¹)
		プライム肥料 栽培区	化成肥料 栽培区	
ハクサイ	カドミウム	不検出	不検出	<0.05
	鉛	不検出	不検出	<0.01
キャベツ	カドミウム	不検出	不検出	<0.05
	鉛	不検出	不検出	<0.01
レタス	カドミウム	0.01	0.02	<0.2
	鉛	不検出	不検出	<0.3



図6 栽培試験時のオクラとパッションフルーツの外観

表5 オクラの栽培試験結果

処理区	可販本数 (本 株 ⁻¹)		可販収量 (g 株 ⁻¹)		可販果率 (%)
化成肥料区	19.8	bc	202.1	ab	85.4
堆肥区	26.0	a	263.4	a	87.8
堆肥-100%減肥区	15.4	c	141.3	b	85.4
プライム肥料区	21.0	bc	216.9	a	88.4
プライム堆肥区	23.0	ab	227.5	a	86.8
プライム堆肥-100%減肥区	19.0	bc	190.8	ab	86.9

※1：n = 8、Steel-Dwass法により異符号間に5%水準で有意差あり。

※2：可販果率は、可販本数/総本数×100で計算した。

表6 パッションフルーツの栽培試験結果

処理区	調査樹 (本)	着花数 (個)	果実数 (個)	着果率 (%)
化成肥料区	5	29	4	13.8
堆肥区	5	34	4	11.8
プライム堆肥区	5	32	7	21.9
有意差	—	—	—	n.s.

※1：着果率＝（果実数/着花数）×100。

※2：n.s. は有意差なし（カイ二乗検定による群の多重比較）

る効果が確認された。また、プライム肥料[®]を腐熟促進材として活用した堆肥は、「プライム堆肥1号」の名称で、届出を行い受理された。

- 3) プライム肥料[®]やプライム堆肥[®]を用い、オクラおよびパッションフルーツを対象としたポット栽培試験を行った。その結果、化成肥料や通常の堆肥を用いた試験区に比べても同等以上の収量や着果率を示し、有害成分についても不検出あるいは許容値を大きく下回る結果が得られた。

今後は、下水処理施設に建設した実規模実証プラントにおいて、下水からのリン回収および肥料としての利用を、より安定的かつ経済的に実現する技術の実証を行う予定である。

謝辞

本研究に際し、石垣市様ならびに沖縄県農業研究センター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) 藤岡勝之、下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会 報告書 脱炭素社会を牽引する「グリーンイノベーション下水道」の実現に向けて、建設機械施工、74（10）、5-9、2022
- 2) 食料安定供給・農林水産業基盤強化本部：食料安全保障強化政策大綱（2022）
- 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2）、フジタ技術研究報告、第58号、pp 55-60、2022
- 4) 東啓太、四十九俊光、関平和、堆肥化に及ぼす木炭混入効果、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、607-608、2010
- 5) （一社）畜産環境整備機構：堆肥化施設設計マニュアル（2020）

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。



尾崎 洋輔