

バイオ炭を活用した次世代型水田稲作農法 生態系サービスの向上を目指して

2023年5月12日

| | | |
|---------|-----|------|
| 環境科学研究所 | 講師 | 飯村康夫 |
| 環境科学研究所 | 教授 | 須戸幹 |
| 環境科学研究所 | 准教授 | 増田清敬 |
| 環境科学研究所 | 准教授 | 皆川明子 |
| 環境科学研究所 | 准教授 | 尾坂兼一 |
| 環境科学研究所 | 講師 | 籠谷泰行 |

第1章 はじめに

世界的な環境問題である気候変動の影響は滋賀県でも顕在化しつつある。例えば、コメやその他農作物に対する高温障害や台風・豪雨被害は増加傾向にあり、近年は琵琶湖の全層循環が完了しないなど気候変動の影響と考えられる現象が滋賀県全域で相次いでいる。このような琵琶湖をとりまく環境に対する気候変動の影響は今後加速度的に増加すると考えられ、この主な原因である大気中の二酸化炭素（CO₂）の削減が求められている。このような背景のもと、我々は滋賀県の主要な農地利用形態である水田において“バイオ炭（バイオチャーとも呼ぶ）”の活用に着目した。バイオ炭は間伐材や農作物残渣などの有機廃材から人為的に作出された炭化物の総称で、従来、安価な循環型土壌改良剤として古くからごく一部の国や地域で使用されてきた⁽¹⁾。近年では、バイオ炭の超難分解性（微生物分解等を受けにくく土壌に残存しやすい性質）が新たに注目され、2019年5月に京都で開催された IPCC 総会ではバイオ炭による農地への炭素貯留が CO₂ 削減技術として正式に採用されている⁽²⁾。すなわち、バイオ炭は土壌中に残存し続けることで大気中の CO₂ を隔離し続けるマイナスカーボン効果と共に土壌改良剤としての機能（作物の収量や品質を維持・向上させること）も期待されている。

バイオ炭を農地に施用することで食糧生産を維持・向上しつつ、大気 CO₂ の削減を目指した研究は 2000 年以降活発化している。特にアメリカや中国における小麦栽培での実証試験が中心となっている⁽³⁾。日本では 2010 年以降、農業分野においてバイオ炭が大きな注目を集め野菜畑を中心に研究が行われており、2020 年には J-クレジットにも認証されている⁽⁴⁾。一方、水田は日本を含むモンスーンアジア地域に広く分布する農地形態であるが、水田におけるバイオ炭研究は畑地に比べ圧倒的に少なく、水田でのバイオ炭施用によるコメの収

量や品質、炭素隔離効果、水質、水生生物など水田生態系全般に対する影響について不明な点が多く残されている。このように水田におけるバイオ炭施用が各種生態系サービスに及ぼす影響について明らかにすることは気候変動対応型の新たな水田稲作農法の確立にも直結する極めて重要な研究テーマであると言える。

本研究の目的は“バイオ炭の活用が複数の水田生態系サービス（地力、食料供給、水質改善、CO₂削減）に及ぼす影響を生物多様性や経済性も含め3年間にわたり明らかにする”ことである（図1）。本研究では2020年度から2022年度にかけて圃場における水稻栽培試験を3年間実施し、各項目において調査した。ただし、調査開始1年目および2年目は新型コロナウイルス感染症の影響もあり当初計画していた調査の一部が実施できない状況であったため、補足データの取得を目的に室内モデル実験やポット栽培試験、小規模圃場実験を追加で行った。

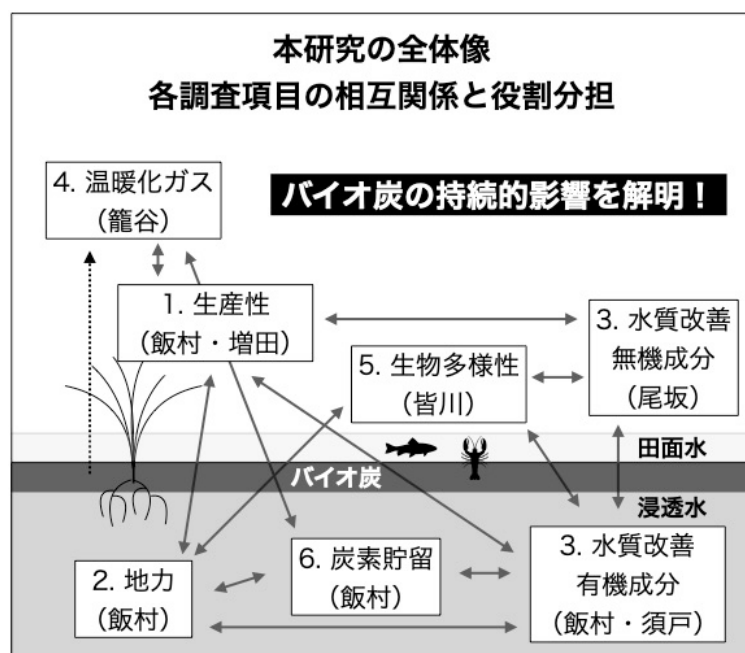


図1 本研究の概要と各調査項目の連関

第2章 圃場試験による水田でのバイオ炭施用効果の検証

本研究は琵琶湖をとりまく主環境の一つである水田においてバイオ炭を活用することで持続的に大気 CO₂ を削減（炭素隔離）しつつ、且つ、他の生態系サービス（地力、食料供給、水質改善等）の維持・向上を生物多様性も含め同時に達成することを目指した次世代型の水田稲作農法の確立に関する研究である。これらを検証するため、滋賀県立大学内水田圃場にて総合的な生態系モニタリング調査研究を2020年度から3年間にわたり行なった。なお、新型コロナウイルス感染症の影響により実施できなかった一部の調査においては室内やポットでのモデル実験を行い補足データとした。

2-1 方法および材料

2-1-1 栽培試験の概要

2020年度から2022年度の3年間にわたり本学の圃場実験施設12号田にて水稲（品種は日本晴）の栽培試験をおこなった。処理区は土壌+化成肥料（対照区）と土壌+バイオ炭+化成肥料（バイオ炭区）とした。各区ともに8m×5mの長方形区画（各面積40m²）を波板を使用して作成した。各処理区とも化成肥料（硫黄リン安444, N:P:K=14:14:14）は栽培指針に準じて施用する予定だったが肥料については不手際があり2020年度および2022年度は栽培指針よりも多めに施用する結果になった（1年目：18kg/10a、2年目：2kg/10a、3年目：46kg/10a Nベース）。除草剤散布（1年目：ジェイフレイドジャンボ、2年目：イネキングジャンボおよびゴエモンジャンボ、3年目：カチボシLジャンボ）は慣行法に準じて散布した。バイオ炭区には栽培1年目の4月中旬にのみバイオ炭としてヤンマーエネルギーシステム株式会社製（YES製）の粃殻くん炭を表層土壌10cm程度に20t ha⁻¹換算で施用した。今回用いた土壌およびバイオ炭の諸特性

について表 1 に示す。各年度における水稲栽培スケジュールは慣行法に準じた。

2-1-2 収量調査

各年度とも基本的に 5 月の連休明けを目処に苗を定植し、9 月下旬～10 月上旬に稲刈りを行った。収量については各処理区から 1m² 区画をランダムに 5～6 箇所選定し、これらの区画内から地上部バイオマスを刈り取った。2～3 週間十分風乾施設にて乾燥した後、わら、もみ、玄米に区分し、重量を測定し各収量とした。

2-1-3 玄米の食味および品質

玄米の食味スコアおよび品質は滋賀県農業技術振興センターの協力を得て測定を行った。玄米の食味スコアは食味分析計（OMEG Analyzer 静岡精機製）を用いて測定を行い、水分（%）、タンパク（%）、アミロース（%）、脂肪酸度の 4 項目から総合的に判定を行った。玄米の品質については穀粒判別器（サタケ製 RGQI 10B）にて整粒歩合・死米率等の分析を行い、農林水産省の玄米検査規格（水稲うるち玄米の品位）に準じて評価を行った。

2-1-4 田面水および土壌水分析

水稲栽培期間において各処理区から田面水および土壌浸透水をポーラスカップもしくは塩ビ管を用いて定期的に採水し各種イオン濃度（NO₂⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、F⁻、Cl⁻、PO₄²⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺）をイオンクロマトグラフ（Dionex Integrion, Thermo Fisher Scientific）で測定した。

2-1-5 農薬（除草剤）動態解析

調査 1 年目は当初予定していた圃場での検証試験が新型コロナの影響で行え

なかったため、モデル実験により土壌（バイオ炭を含む）への除草剤吸着特性や除草剤効果の検証をおこなった。吸着実験は対照区土壌を土壌区、バイオ炭を混合した土壌を混合区、バイオ炭そのものを用いた処理区をバイオ炭区とした。栽培試験で用いた除草剤であるジェイフレイドジャンボの成分（デストシルピラゾレート、ジメタメトリン、ピラクロニル、プレチラクロール、イマゾスルフロン、ブロモブチド、ハロスルフロンメチル、ベンゾビシクロン、ピラゾレート、メフェナセット、テフリルトリオン、オキサジクロメフォン）を吸着実験に用いた。2年目以降も同様に室内における吸着実験をA剤（イマゾスルフロン、ブロモブチド、イプフェンカルバゾン）およびB剤（ピラゾレート、ピラクロニル、ベンゾビシクロン）を用いて継続した。

除草剤効果の検証実験は2年目以降に行った。2年目はA剤（イマゾスルフロン、ブロモブチド、イプフェンカルバゾン）およびB剤（ピラゾレート、ピラクロニル、ベンゾビシクロン）を用いてポット試験を実施した。土壌およびバイオ炭は圃場試験と同じものを用い、バイオ炭は 2t ha^{-1} 換算で土壌に混合した。3年目はスパークスター（エスプロカルブ、ジメタメトリン、ピラゾスルフロンエチル、プレチラクロール）を用いてポット試験を実施した。土壌へのバイオ炭混合量は 2t ha^{-1} を基準に2、4、8、16倍と段階的に増加させ検証した。

2年目以降は実際の圃場にて栽培期間中における除草剤の動態を解析するため定期的に田面水および浸透水を採水し各種除草剤成分濃度をLC/MSで分析した。

2-1-6 土壌炭素隔離効果ポテンシャル

土壌への炭素隔離効果ポテンシャルを評価するため各処理区において土壌への累積炭素インプット量を測定した。炭素インプット量としては毎年土壌へ還元されるイナワラを定量した。また、バイオ炭区においては初年度に施用した

バイオ炭をインプット量として考慮した。また、栽培前土壌および栽培後土壌を深さ 10cm からランダムに 5 地点から採取しコンポジットサンプルとして風乾細土に調整後 CN アナライザー (スミグラフ NCH22A) で炭素量を測定した。

2-1-7 水生生物

各処理区における水生生物の個体数や種数について年度別に評価した。1 年目は中干し開始前の 5 月 27 日および 6 月 16 日の計 2 回、栽培試験地における各処理区で 4 つのコドラートを作成し、それらから水生生物の採取を行なった。2 年目は中干し開始前の 5 月 24 日および 6 月 18 日の計 2 回、両処理区で 5 つのコドラートを作成し、それらから水生生物の採取を行なった。3 年目は中干し開始前の 5 月 30 日および 6 月 13 日の計 2 回、両処理区で 5 つのコドラートを作成し、それらから水生生物の採取を行なった。

2-1-8 温室効果ガス分析

2 年目である 2021 年度は各処理区から発生するメタン (CH_4) および亜酸化窒素 (N_2O) を測定した。栽培期間中にクローズドチャンバー法にて定期的にガスを採取しガスクロマトグラフ (Shimazu, GC14B) で CH_4 と N_2O を分析した。

2-1-9 経営収支評価

コスト面を評価するために収量データ等と文献資料^(7, 8)を基にした経営収支評価を行った。

2-2 結果および考察

2-2-1 生育状況および収量

各年度における収量の結果を図 2 に示す。1 年目である 2020 年度はわら重と

もみ重は処理区間に有意差（5%水準）は認められなかったが、玄米重は対照区で有意に高い値を示した。2年目は1年目とは異なり全ての項目においてバイオ炭区では高い傾向を示し、特にわら重は有意差が認められた。3年目はいずれの処理区もいもち病が発生し収量や品質に大きな影響を及ぼした。その結果、全ての項目において1年目および2年目と比べ値は減少し、両区間の正当な比較は困難となった。1年目および3年目は両区ともに人為的なミスにより一般的な慣行法よりも施肥量が多くなってしまった。この影響が少なからず各収量に影響を及ぼしていると考えられる。一方、2年目は慣行法よりも少ない施肥量で栽培を行った。その結果、対照区に比べバイオ炭区は各収量が向上する傾向を示した。また、今回栽培した「日本晴」とは品種が異なるが滋賀県が提唱している「みずかがみ」の収量目標⁽⁵⁾の540 kg m⁻²を超えていた。これらの結果は水田におけるバイオ炭施用が比較的施肥量の少ない条件下で収量を向上させる可能性を示すものである。

2-2-2 食味および品質

各年度における玄米の食味および品質の結果を図3に示す。1年目は両区で品質に有意差は認められなかったものの食味スコアは対照区に比べバイオ炭区で有意に高い値を示した。2年目は食味スコアおよび品質ともに両区間で有意差は認められなかったがいずれの項目も1年目より向上していた。3年目はいもち病の発生が関係し食味および品質とも1、2年目と比べ全体的に値は低下していた。施肥量が比較的少なかった2年目において食味および品質が全体的に向上し、両区とも1等米レベルを示したことから食味や品質はバイオ炭施用の有無よりも施肥量、特に窒素量に依存することが示唆された。

2-2-3 田面水および浸透水

1年目は各処理区から田面水（5/29のみ）と浸透水（5/29、6/24、9/8）をそれぞれ3地点から採取し各種栄養塩濃度（ F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ）を測定した。5/29に採水した田面水は処理区間で有意差は認められなかった。一方、同日に採水した浸透水はバイオ炭区で NH_4^+ が有意に低く、 K^+ と Mg^{2+} が有意に高い結果を示した（図4）。6/24に採水した浸透水はいずれの栄養塩も処理区間で有意差は認められなかった。9/8採水した浸透水はバイオ炭区で SO_4^{2-} が有意に高い値を示した。2年目は両処理区から田面水を5/21と6/23に、浸透水を6/2、6/16、7/1に採水し溶存態N、 NH_4^+ 、 NO_3^- 濃度を測定した。田面水は中干し前の5/21では全体的にバイオ炭区で濃度が高く、中干し後の6/23はバイオ炭区で濃度が低かった。浸透水はいずれの時点でも全体的にバイオ炭区で濃度が低く、その差は栽培期間が進むにつれ大きくなった。これらの結果はバイオ炭区では各種Nが土壤に吸着されやすい、あるいはイネにより多く吸収利用されたことを示唆する。

2-2-4 農薬（除草剤）動態

1年目および2年目に室内での除草剤吸着実験を行った結果、多くの成分が土壤区<混合区<バイオ炭の順で吸着しやすいことが明らかとなった。バイオ炭を $2t\ ha^{-1}$ 換算で土壤に混合した場合、除草剤効果は混合しない場合に比べ変化は見られなかった。一方、バイオ炭施用量を段階的に増加させた場合、バイオ炭施用量の増加に応じて除草剤の効果は低減することが示された。特に着目すべき結果としてバイオ炭施用量が $8t\ ha^{-1}$ （BC×4）までは除草剤効果の変化はほとんど認められないものの、 $16t\ ha^{-1}$ （BC×8）からは極端に除草剤効果が低下することが明らかとなった（図5）。

2-2-5 土壤炭素隔離効果ポテンシャル

両区における累積炭素インプット量を図 6 に示す。1 年目はバイオ炭施用の影響により対照区に比べバイオ炭区は 2 倍以上の炭素インプット量があった。2 年目以降は両区ともほぼ同等量がイナワラとして供給されていた。水田に使用されたバイオ炭は少なくとも 5 年間はほぼ分解されることなく残存することが報告されており⁽⁶⁾、我々が行ったバイオ炭分解実験結果でも 1 年間に重量比で分解量は 10%未満であることが示されている。これらの結果を考慮すると水田土壌に施用されたバイオ炭は少なくとも数年間は施用量に依存して炭素が隔離されることが示唆された。

2020 年度から 2 年間の土壌炭素含有量の経時変化を見ると、栽培前は対照区、バイオ炭区ともに 2130 gC m^{-2} であり栽培後 1 年目はそれぞれ 2441 gC m^{-2} と 2792 gC m^{-2} であった。さらに栽培後 2 年目では対照区が 2338 gC m^{-2} 、バイオ炭区が 2892 gC m^{-2} となった。バイオ炭区では栽培後 1 年目も 2 年目も施用したバイオ炭とほぼ同量の炭素 (670 gC m^{-2}) が上乘せされた値を示しており、バイオ炭施用量に依存した炭素隔離が土壌で生じていることが示された。

2-2-6 水生生物

1 年目はどちらの処理区もユスリカ科が主で、その他ゲンゴロウ科やアマガエル科の水生生物が見られた。水生生物の多様性（種類数）を慣行区（平均 4 種類）とバイオ炭区（平均 7 種類）を比較すると、5 月 27 日ではバイオ炭区で有意に高い値を示した（図 7）。6 月 16 日はどちらの処理区も平均 5 種類で有意差は認められなかった。2 年目はどちらの処理区もユスリカ科が主で、その他ミズミズ科やイシビル科などの水生生物が見られた。5 月 24 日の水生生物の平均種類数と平均個体数は慣行区でそれぞれ 1.2 と 1.2、バイオ炭区で 2.2 と 2.6 でありバイオ炭区で有意に高かった。6 月 18 日は両処理区でいずれも大幅に数値は上がったが処理区間に有意差は無かった。3 年目はどちらの処理区も

ユスリカ科が主で、その他ミズミミズ科やイシビル科などの水生生物が見られた。両処理区で種数および個体数ともに有意差は認められなかった。以上より、バイオ炭施用による水生生物への悪影響等は無いと結論付けた。

2-2-7 温室効果ガス

各処理区における CH₄ と N₂O フラックスの経時変化を図 8 に示す。CH₄ は対照区 (45.8) に比べバイオ炭区 (37.9) で放出量が少ないことが示された。また、N₂O は両処理区とも値は非常に小さくマイナスでほぼ同等であった。全体としては栽培期間を通してバイオ炭区の方が温室効果ガスは発生し難い結果となった。

2-2-8 経営収支評価

コスト面を評価するために収量データ等を基にした経営収支評価を行った。1 年目における比例利益の試算結果は、対照区で 116,858 円/10a とプラス値を示したが、バイオ炭区は -113,591 円/10a と大幅にマイナス値であった。バイオ炭区で比例利益が大幅なマイナスとなった原因は、肥料費に計上されたバイオ炭の購入代金によるものである。2 年目は対照区で 118,480 円/10a、バイオ炭区で 117,404 円/10a であった。3 年目は慣行区で 71,553 円/10a、バイオ炭区で 48,907 円/10a であった。1 年目のバイオ炭区ではバイオ炭を散布したことにより肥料費が上がり比例利益が大幅なマイナス (-113,591/10a) となったが、2 年目以降の比例利益は両区で大きな差はなかった。2020 年 9 月にバイオ炭が炭素貯留の有効な方法として日本政府の J-クレジット制度に認定されたことから、将来的にはバイオ炭区における比例利益がさらに向上することも期待される。

表 1 土壌およびバイオ炭の諸特性

| | pH (H ₂ O) | EC (mS m ⁻¹) | CEC (cmolc kg ⁻¹) | TC (g kg ⁻¹) | TN (g kg ⁻¹) | 揮発性成分 (%) | 固定態成分 (%) | 灰分 (%) |
|------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-----------|
| 土壌 | 5.8 | 22.4 | 8.1 | 24.5 | 5.8 | N.D. | N.D. | N.D. |
| バイオ炭 | 9.7 | N.D. | 32.1 | 335 | 3.7 | 25.3 | 13.6 | 56.4 |

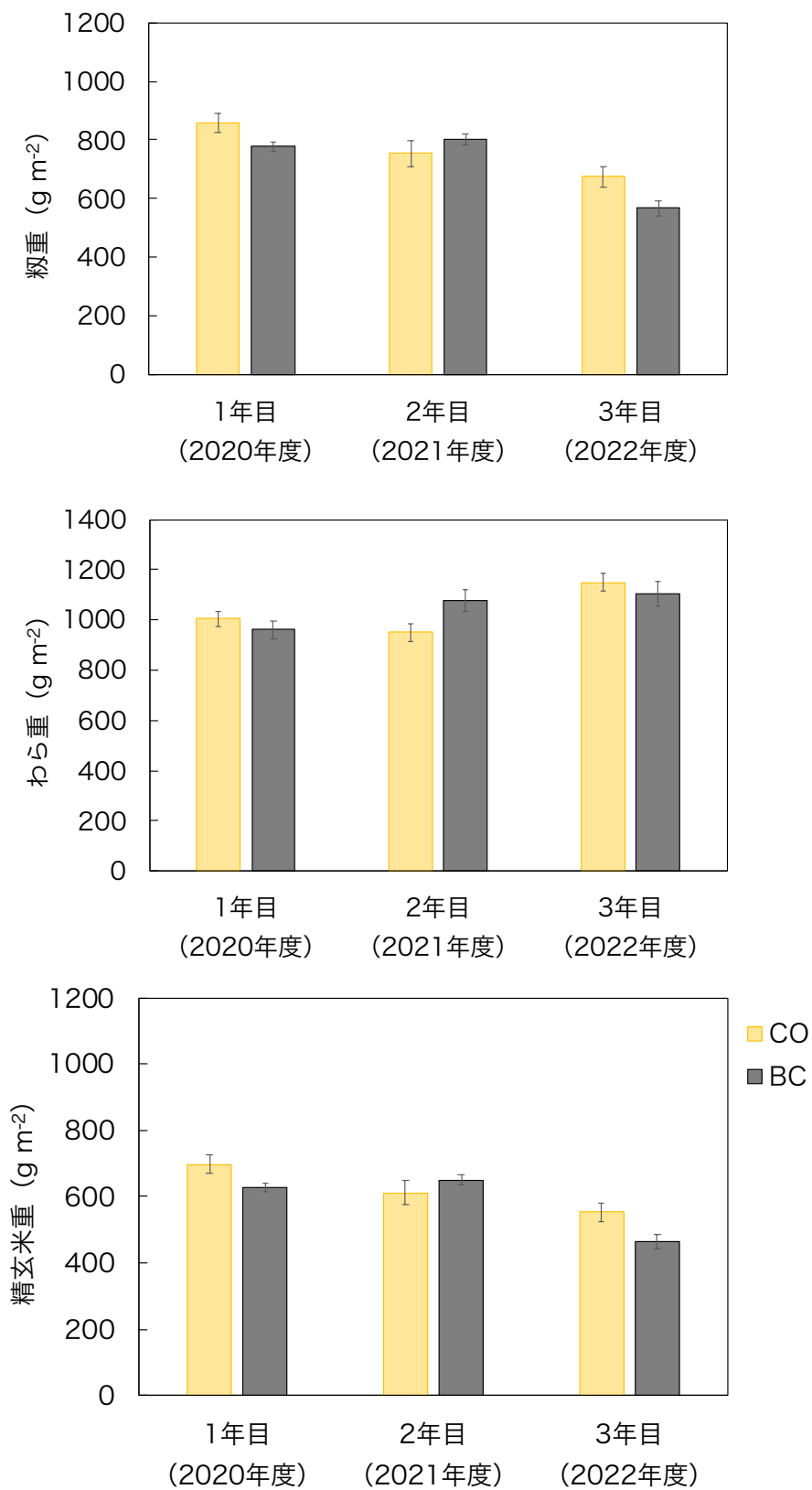


図2 対照区 (CO) およびバイオ炭区 (BC) の各収量

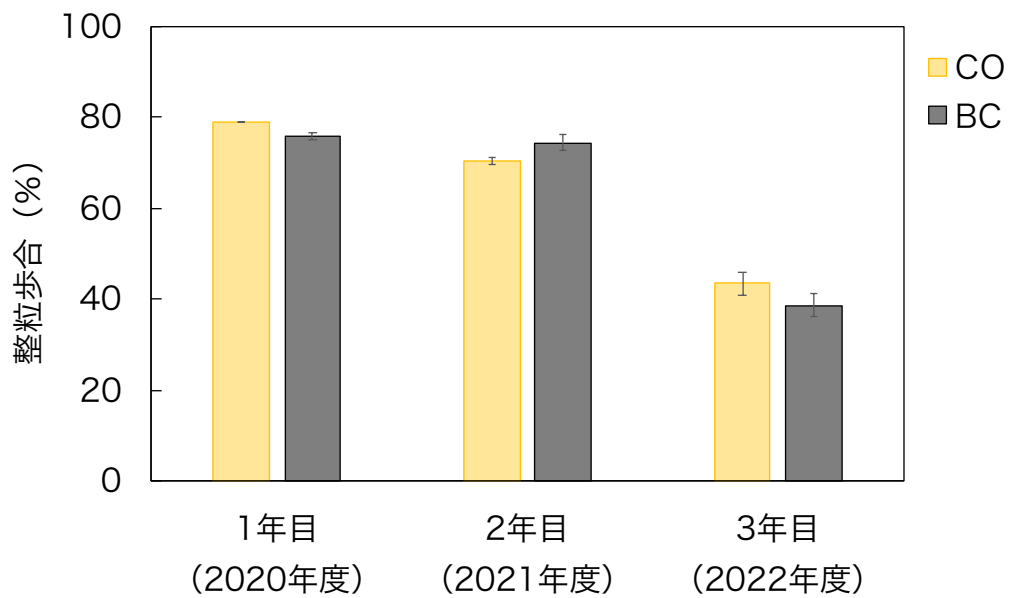
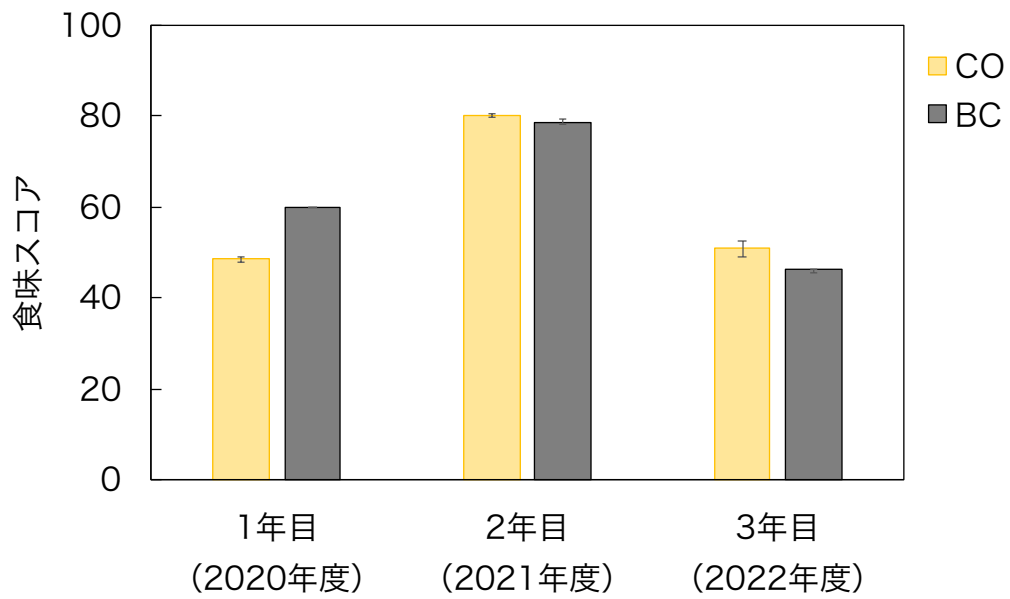


図3 対照区 (CO) およびバイオ炭区 (BC) の食味スコアおよび整粒歩合

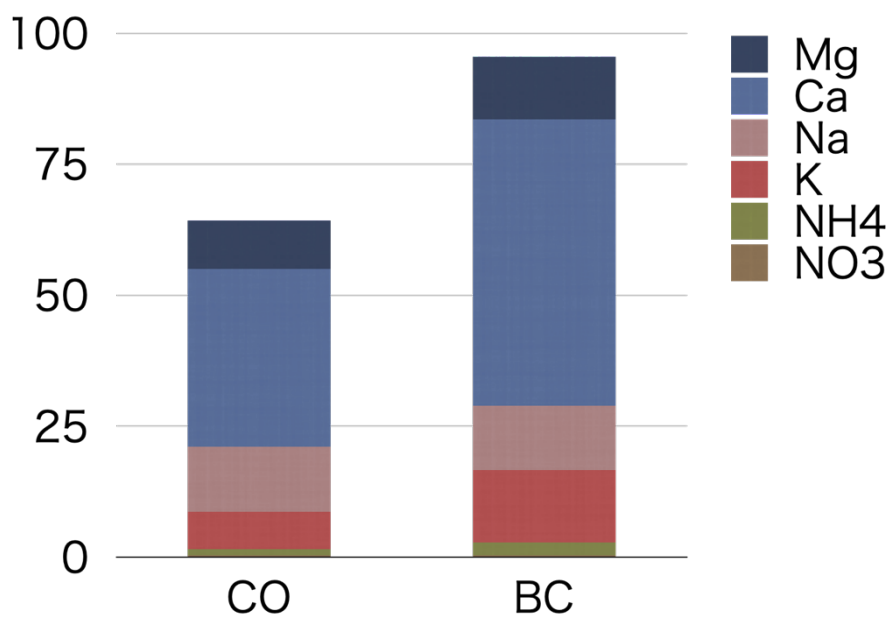


図4 対照区 (CO) およびバイオ炭区 (BC) の土壤水 (1年目 5月12日) の各種イオン濃度 (mg L⁻¹)

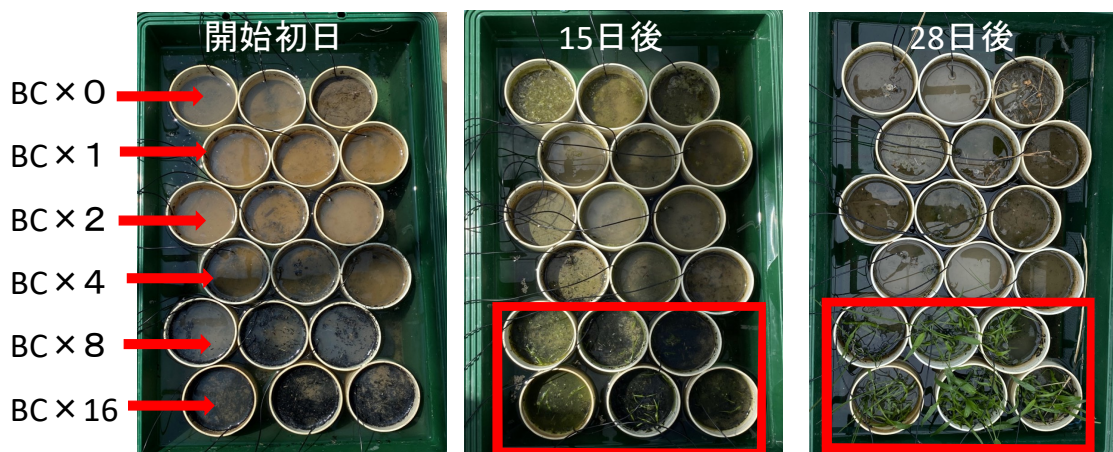


図5 ポット試験による除草剤効果の検証実験結果

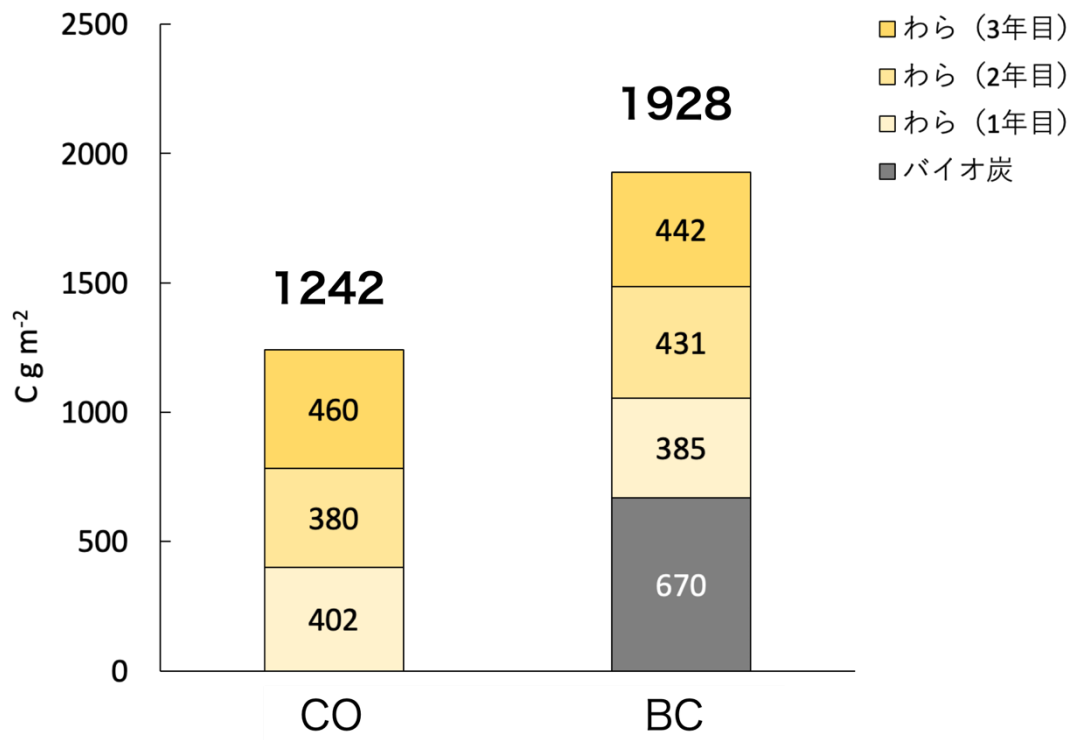


図6 対照区 (CO) およびバイオ炭区 (BC) の累積炭素インプット量

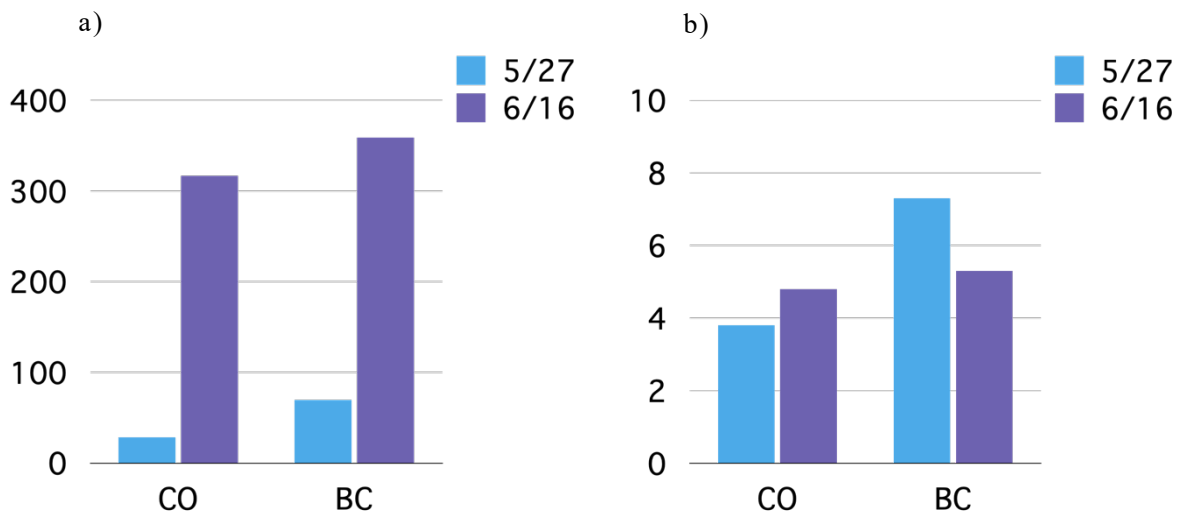


図7 1年目における対照区 (CO) およびバイオ炭区 (BC) の a) 個体数、b) 種数

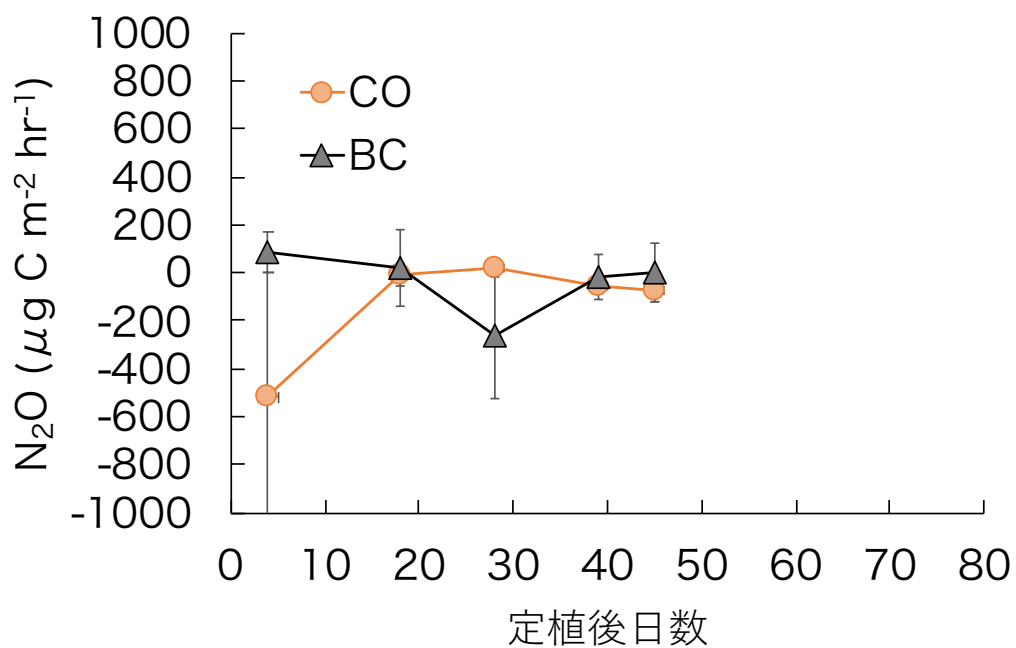
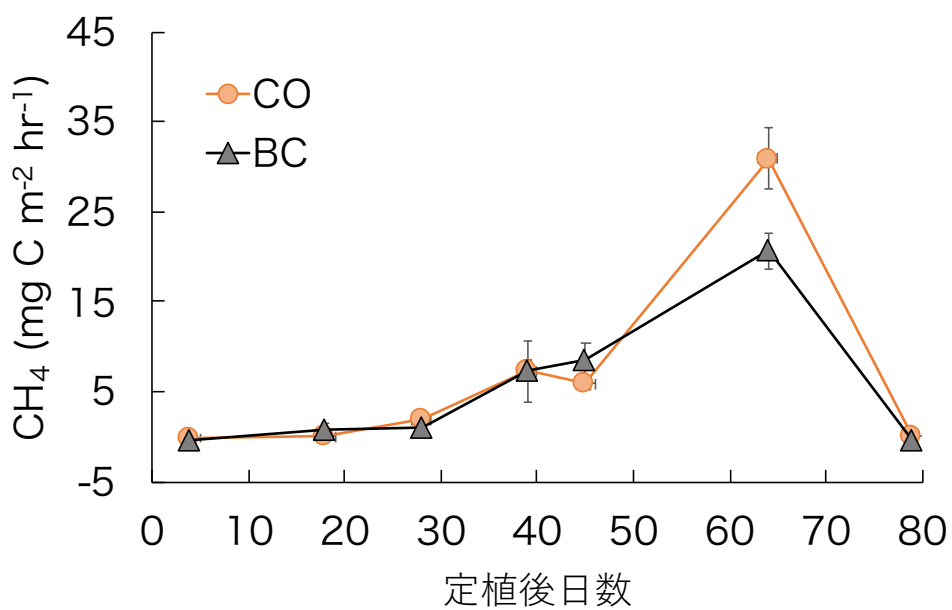


図8 2年目における対照区(CO)およびバイオ炭区(BC)のCH₄、N₂Oフラックス

第3章 水田でのバイオ炭施用がコメの収量および品質に及ぼす影響の再検

証：ポット栽培試験

前章で示した圃場試験では人為的なミスもあり化成肥料の施肥管理が当初予定していたものとは異なっていた。加えて圃場試験での結果では化成肥料の施肥量が少ないほどコメの収量や品質に及ぼすバイオ炭施用効果が顕著に現れる可能性が見出された。そこで本研究では追加実験として化成肥料の施肥量を極力抑えた条件下（滋賀県における環境こだわり農法を参考）で水稻のポット栽培実験を試みた。

3-1 方法および材料

3-1-1 栽培試験の概要

土壌は滋賀県立大学内圃場の12号田の水田土壌を用いた。2021年5月中旬に12号田の作土層（深さ15cm）から土壌を採取した。処理区はバイオチャー区（RBC区）、慣行区（RCO区）、イネなしバイオチャー区（BC区）、イネなし慣行区（CO区）の4処理区を設け、4連で行った。栽培には1/5000aワグネルポットを用いた。すべてのポットに土壌を乾燥重量で約2.4kg入れ、化成肥料（硫化リン安444, N:P:K=14:14:14）を0.1g（50kg/ha換算）加えた。使用した化成肥料は一般的に200kg/ha換算で施用するが、今回の実験ではバイオチャーによる土壌改良効果も期待して通常施用量の1/4に留めた。各処理区のうちRBC区、BC区ではバイオチャー40g（20t/ha換算）を全層施用した。また、各処理区のうち、RBC区、RCO区ではイネを2株定植した（6月1日）。すべてのポットは水田の水管理を再現するため、湛水深が3cmとなるように網室の水道水を1.3kg加えた。湛水状態の期間は、水位を3cmに保つために網室の水道水を用いて管理した。ポット栽培期間（2021年6月1日～10月21日の計143日間）

中は湛水状態 48 日（2021 年 6 月 1 日～7 月 19 日）～中干し状態 15 日（7 月 19 日～8 月 3 日）～湛水状態 44 日（8 月 3 日～9 月 16 日）～落水状態 35 日（9 月 16 日～10 月 21 日）のスケジュールで栽培管理を行った。中干し状態および落水状態では、ワグネルポットの底から 5cm の位置にある排水部のゴム栓を外して排水を行った後、ポットを受け皿の上に移動させた。その後ポットが完全に乾燥することを防ぐために排水部の高さまでポットが水に浸かるよう受け皿に水を入れて管理した。

3-1-2 生育および収量調査

イネは 1 週間おきに草丈と SPAD 値を測定した。草丈はイネの草を握り地面から垂直に上に持っていき、地表から一番高いところまでの長さを測定した。SPAD 値はイネから無作為に選んだ 3 点で葉緑素計（SPAD-502PLUS、コミカミノルタ）を用いて計測し、その平均値をポットのイネの SPAD 値とした。草丈および SPAD 値は、イネの茎、葉の成長が落ち着く中干し終了時まで計測を行った。

収穫時には各ポットで地表から 3cm のところでイネを刈り取り、ポットごとに網室で十分に乾燥させた。その後全重量を測定し、玄米にして玄米重も測定した。イネ全体の成長に対してどれだけの栄養が米に送られたかの目安を見るために、イネ全体の重量に対する玄米重の割合を以下の式で求めた。

$$\text{全重量に対する玄米重の割合} = \text{玄米重 (g)} / \text{全重量 (g)} \quad \text{①}$$

3-1-3 土壌間隙水の各種窒素濃度測定

ポット栽培期間の湛水状態時に 2 週間に一回程度の頻度で土壌水を採水した。土壌水はミズトール（Daiki 社製）を用いて各ポットの土壌表面から 10cm

の深さの地点より採水し、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、全窒素（TN）濃度を定量した。栽培開始時の土壌水の NH_4^+ 濃度は、施肥した化成肥料の NH_4^+ 量と水管理に用いた水道水中の NH_4^+ 量（7月8日、7月19日、9月3日に水道水を採取し測定した NH_4^+ 濃度の平均値に土壌水量をかけて算出）の合計を、土壌水量で割り計算した。栽培開始時の土壌水の NO_3^- 濃度は、水管理に用いた水道水の NO_3^- 濃度の平均値とした。栽培開始時の TN 濃度から NH_4^+ 濃度、 NO_3^- 濃度の値を引くことで、栽培開始時の有機態 N 濃度を求めた。

採水試料の NH_4^+ 、 NO_3^- 濃度測定は、イオンクロマトグラフ（ICS-1100、DIONEX）で測定した。同じ土壌水中の TN 濃度は、オートアナライザー（OG-FI-300、小川商会）によって測定した。土壌水に含まれる N の形態は主に NH_4^+ 、 NO_3^- 、有機態 N であるため、以下の式で求めた値を有機態 N の濃度とした。

$$\text{有機態 N 濃度 (mg/L)} = \text{TN (mg/L)} - \text{NH}_4^+\text{濃度 (mg/L)} - \text{NO}_3^-\text{濃度 (mg/L)}$$

②

体積をもとに計算すると、ポット内の田面水は 0.6kg となった。そのためポット内の水 1.3kg のうち土壌水は 0.7kg (L) となる。よって、上で求めた各種 N 濃度をもとに、各処理区の土壌水に含まれる各種 N 量(mg)を次の式で求めた。

$$\text{土壌水の各種 N 量 (mg)} = \text{各種 N 濃度 (mg/L)} \times 0.7 (\text{土壌水の量 (L)}) \quad \textcircled{3}$$

3-2 結果および考察

3-2-1 生育および収量調査

草丈および SPAD 値の推移のグラフを図 9、10 に示す。SPAD 値とは葉に含まれる葉緑素含量を表す値であり、植物体の N 含量が多くなることで葉緑素含量が増加して葉の緑色が濃くなることが知られている。草丈は定植から 37 日目まで RBC 区の方が RCO 区よりも高くなった。特に定植後 30 日目では有意差が見られた。SPAD 値は、時間がたつにつれて RCO 区の方が RBC 区よりも僅かに高くなる傾向があったが有意差はなかった。

収量調査（全重量、ワラ重、玄米重）のグラフを図 11 に、全重量に対する玄米重の割合のグラフを図 12 に示す。全重量、ワラ重、玄米重のいずれにおいても、RBC 区の方が RCO 区よりも高い傾向であったが、有意差は無かった。イネの全重量に対する玄米重の割合も BC 区の方がやや大きい傾向であったが有意差はなかった。

3-2-2 土壌間隙水

各処理区の土壌水に含まれる NH_4^+ 量のグラフを図 13 に示す。 NH_4^+ は BC 区、CO 区共に栽培開始時から減少する傾向を示した。イネを栽培した RBC 区を見ると、イネがない BC 区と比べ栽培期間を通して常に低い値を示し、RCO 区も同じ傾向であった。全処理区で定植後 107 日には土壌水の NH_4^+ 量は大きく減少しており、ほとんど残っていなかった。イネのない BC 区、CO 区では、中干し期頃に NH_4^+ の濃度が増加した。

各処理区の土壌水に含まれる NO_3^- 量のグラフを図 14 に示す。 NO_3^- も NH_4^+ と同様に栽培期間を通して減少傾向を示したが、イネの有無や BC の有無による差はほとんど認められず、全体的に量はかなり少なかった。

有機態 N の結果を図 15 に示す。有機態 N は開始時から播種後 23 日目までに大きく増加した。その後は栽培期間を通して BC 区で減少傾向を示したが、CO 区は横ばいの傾向を示した。BC 区、CO 区共に中干し後は一気に減少した。イ

ネを栽培した RBC 区を見ると、イネがない BC 区と比べ中干し前まで常に低い値を示し、その傾向は RCO 区よりも大きかった。BC 区と CO 区の有機態 N 量を比較すると、栽培開始初期(23 日)のみ BC 区の有機体 N 量のほうが CO 区より多かった。また NH_4^+ 量と比較すると、栽培期間中の有機体 N 濃度の減少傾向はあまり大きくなく、定植後 107 日時点においても有機態 N は土壤水中に残っていた。

栽培期間中におけるイネなしポットの各種窒素濃度の変化からバイオ炭有無による窒素の利用ポテンシャルを考察した(表 2)。その結果、バイオ炭区では NH_4^+ の利用ポテンシャルが 14%増加することがわかった。一方で有機態窒素の利用ポテンシャルは 12%減少した。また、イネありポットの結果からバイオ炭区ではイネがあることで対照区に比べ 66%の窒素(特に NH_4^+ と有機態窒素)が減少していることがわかる(表 3)。これは対照区に比べバイオ炭区ではイネによる吸収利用やイネの存在による形態変化、あるいはバイオ炭の存在による吸着が生じやすいことを示唆する。

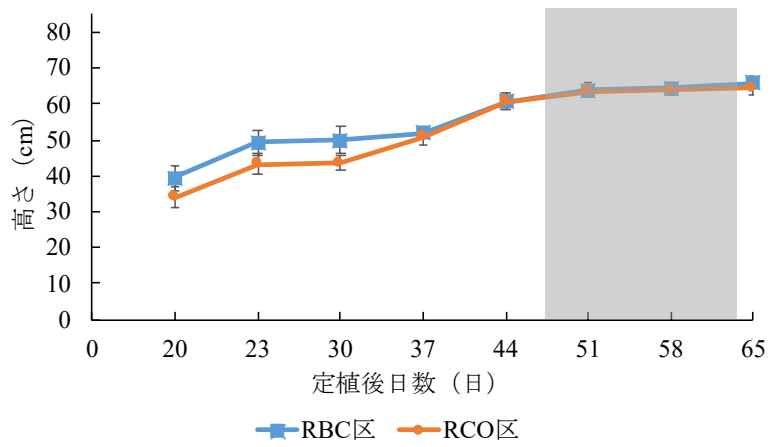


図9 バイオ炭区 (RBC) と対照区 (RCO) におけるイネの草丈

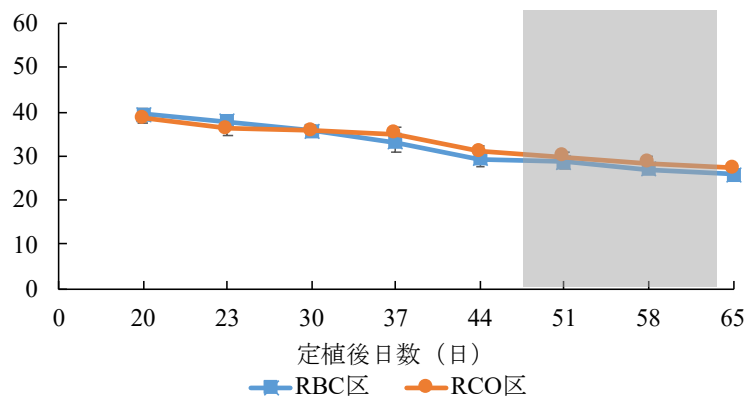


図10 バイオ炭区 (RBC) と対照区 (RCO) における SPAD 値

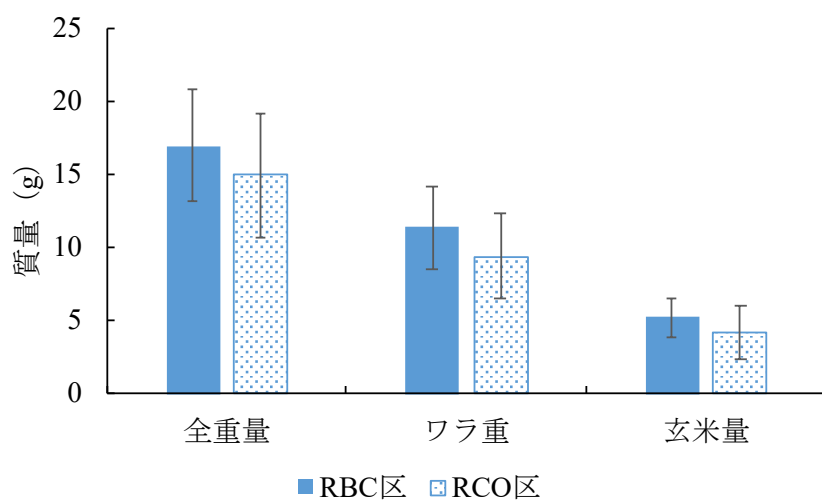


図 11 バイオ炭区 (RBC) と対照区 (RCO) における収量

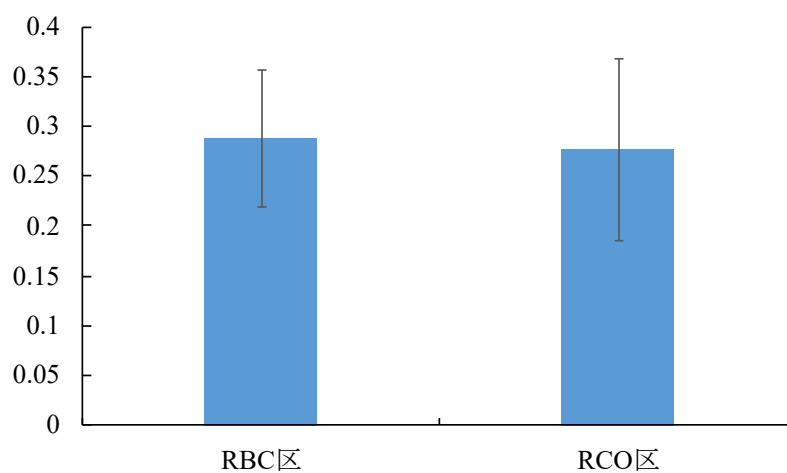


図 12 バイオ炭区 (RBC) と対照区 (RCO) におけるイネ全重量に対する玄米重の割合

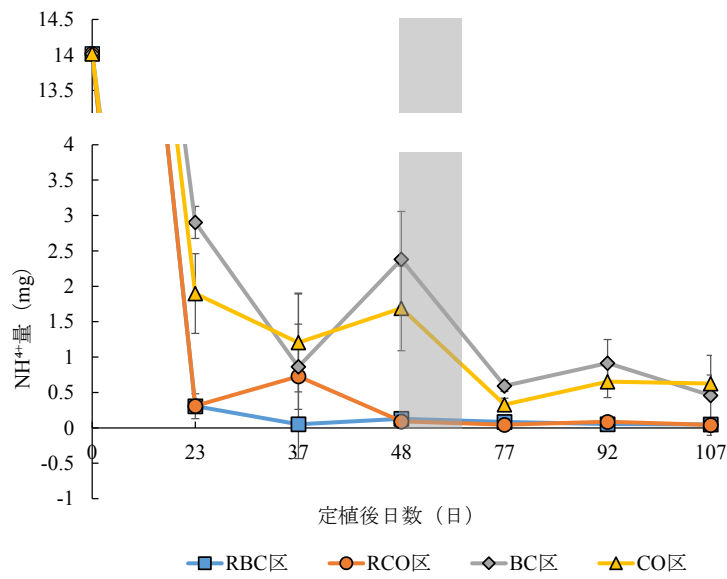


図 13 各処理区における土壌間隙水の NH₄⁺量

RBC：イネありバイオ炭区、RCO：イネあり対照区、BC：イネなしバイオ炭区、CO：イネなし対照区。グレー部分は中干し期

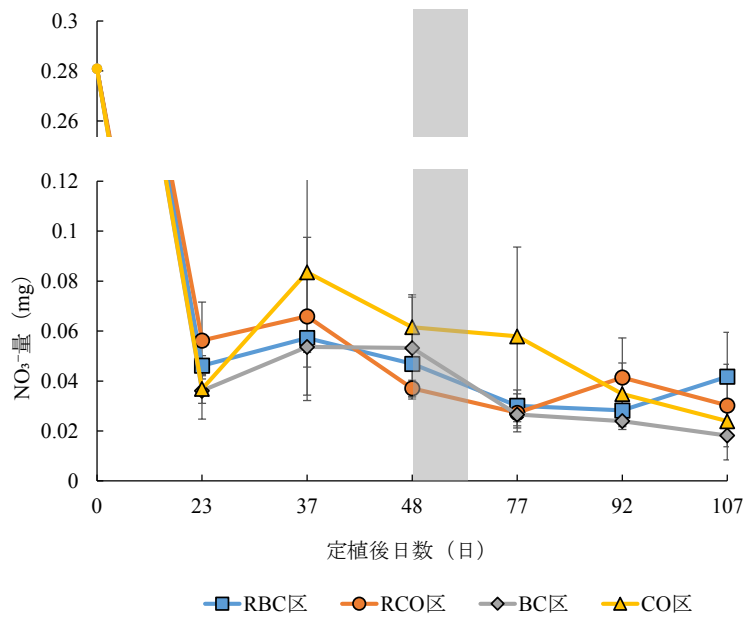


図 14 各処理区における土壌間隙水の NO₃⁻量

RBC：イネありバイオ炭区、RCO：イネあり対照区、BC：イネなしバイオ炭区、CO：イネなし対照区。グレー部分は中干し期

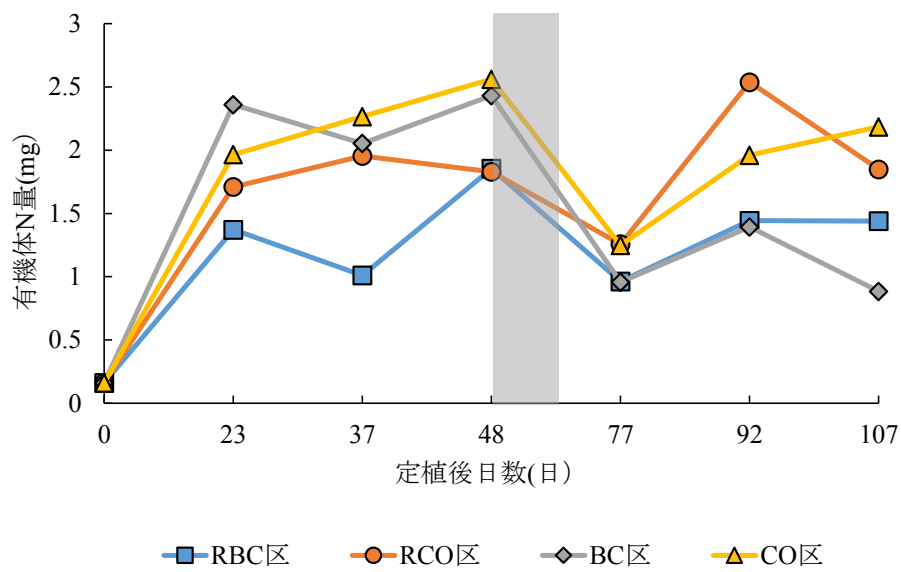


図 15 各処理区における土壌間隙水の有機態窒素量

RBC：イネありバイオ炭区、RCO：イネあり対照区、BC：イネなしバイオ炭区、CO：イネなし対照区。グレー部分は中干し期

表2 イネなしポット土壌での各種 N 量

| | 対照区 | バイオ炭区 | バイオ炭区-対照区 |
|-----------------|-----|-------|-----------|
| NH_4^+ | 267 | 303 | 37 |
| NO_3^- | 8 | 7 | -1 |
| 有機体N | 191 | 169 | -23 |

表3 各ポット土壌での各種 N の減少量（イネなし-イネあり）

| | 対照区 | バイオ炭区 | バイオ炭区-対照区 |
|-----------------|-----|-------|-----------|
| NH_4^+ | 86 | 130 | 44 |
| NO_3^- | 1 | -1 | -2 |
| 有機体N | 20 | 49 | 29 |

第4章 水田でのバイオ炭施用がコメの収量および品質に及ぼす影響の再検証：小規模圃場試験

前章に引き続き水稲栽培におけるバイオ炭施用効果について再検証を行うため化成肥料の施肥量を極力抑えた条件下で水稲の小規模圃場栽培試験を試みた。

4-1 方法および材料

4-1-1 栽培試験の概要

調査地は滋賀県立大学内圃場の12号田の水田を用いた。2022年の4月27日に耕耘を行い、縦1m×横1mの範囲を波板で囲んだ区を計10区作成した。そのうち5つを慣行区として設定し、残り5つをバイオ炭区として設定した。またバイオチャー区にはこの作業時にバイオ炭（YES製粃殻くん炭）を施用量が20t/haになるように深さ0~10cmの範囲内へ漉き込みを行った。

その後2022年5月16日に田植えを行った。栽培品種は「日本晴」を使用した。また田植えの際には苗を3固体で1株として扱い、区1つごとに20株を定植した。なお、除草剤は「あっぱれZジャンボ」を400g/10a換算で散布し、基肥として硫化リン安444（N:P:K=14:14:14）を窒素換算で2.0kg/10a施用した。なお、そのあとに追肥として2.0kg/10aを施用する予定はあったものの、稲の成長が十分と考えられたため「追肥は不要」と判断した。

これ以降の栽培に関して、6月24日~7月10日に中干しを行い、10月3日に収穫作業と収穫した植物体の風乾作業を行い、10月24日に脱穀作業と収穫量の計測作業を行った。

4-1-2 生育および収量調査

栽培期間中に各区に定植された20株の中から6株を「調査株」として選定

し、定植の次の週からイネに穂がついたことが確認されるまでの期間、それらの株の草丈と SPAD 値を定期的に調査した。計測日は 6 月 2 日（この日は草丈のみ）・6 月 15 日・6 月 23 日・6 月 30 日・7 月 13 日・7 月 28 日であった。

なおこの調査で計測した「SPAD 値」とは葉に含まれる葉緑体量の目安となる値であり、植物体内の葉緑体量が多い（葉の緑色が濃い）ほど高い値となる傾向があるものである。調査の際に草丈は調査株ごとに地表部分から最も長い葉までの長さを計測した。SPAD 値は調査株 1 株ごとに 3 か所を計測して、その値を平均したものを「調査株の SPAD 値」として扱った。

イネは 10 月 3 日に収穫してから屋根付き網室で 3 週間風乾を行い、10 月 24 日に脱穀作業を行った。その際に各区から収穫されたもみ重および玄米重を計測した。

4-1-3 玄米の食味値および品質調査

コメの品質と食味値の測定は滋賀県農業技術振興センターにて分析を行った。玄米の整粒歩合・死米率等の品質の分析は穀粒判別器（サタケ製 RGQI 10B）にて分析を行い、前述した農林水産省の玄米検査規格（水稻うるち玄米の品位）に準じて評価を行った。また、食味に関する各値（タンパク率、アミロース率、脂肪酸度、食味スコア）の分析は食味分析計（静岡製機製 OMEG Analyzer）にて玄米を用いて行った。

4-1-4 土壌間隙水

栽培期間中の 5 月 9 日から 9 月 2 日まで土壌水の採水を午前中の時間帯で定期的に行った（計 11 回）。各処理区ともランダムに 3 個ずつミズツール（Daiki 社製）を深さ 5 cm に設置し土壌水を採取した。各土壌水は PTFE シリンジフィルター（25mm, 0.45 μ m）で濾過を行い、ポリプロピレン製ボトルで冷凍保存し

た。各土壌水を用いて NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N 濃度を測定した。分析はイオンクロマトグラフ(Dionex Integrion, Thermo Fisher Scientific) を用いて行った。また、FIA (OG-FI-310PO) で、シリカ (Si) の分析も行った。

4-2 結果および考察

4-2-1 生育および収量

草丈の推移状態と前回調査時からの成長度合い（成長速度）の調査結果を図 16 と 17 に、SPAD 値の推移状態の調査結果を図 18 に示す。草丈は全調査期間中においてバイオチャー区の方が高い傾向があり、5%の有意水準で有意差があった。また成長度合いに関しては第 3 回（定植後 38 日目）及び第 4 回調査時（定植後 45 日目）において、バイオチャー区が 5%の有意水準で高い傾向がみられ、その他の調査日の調査結果には慣行区とバイオチャー区の間には有意差はみられなかった。中干しは 6 月 24 日（定植後 39 日目 第 3 回調査の明日）から 7 月 10 日（定植後 56 日目 第 5 回調査の 3 日前）に行われていたことから、草丈に関しては、中干しの直前と中干し期間中の成長速度に差が出ていた。

SPAD 値の推移状態を見たところ、両処理区ともに第 2 回調査時の中干し開始の前日をピークにそれ以降は徐々に減少していく傾向がみられた。また SPAD 値の減少はバイオチャー区においてより強く見られており、第 4 回調査以降はバイオチャー区の方が慣行区よりも低い値を示す傾向がみられた。なお、第 1・2 回（定植後 30 日目・定植後 38 日目）ではバイオチャー区の方が 5%の有意水準で有意に高く、第 4・5 回（定植後 58 日目・定植後 73 日目）では慣行区の方が 5%の有意水準で有意に高かった。

もみ重の測定結果を図 19 に、玄米重の測定結果を図 20 に示した。この結果からもみ重および玄米重の双方ともバイオチャー区の方が高い傾向があることが分かった。しかし、5%の有意水準で有意差は見られなかった。

4-2-2 食味および品質

玄米の品質に関する内容の測定結果の結果を表 4 に、食味スコアの調査結果を表 5 に示した。

品質に関しては両方の区で 1 等米の基準を満たしていた。また、各調査内容について両区間には 5%の有意水準で有意差は見られなかった。このほかにも「異類穀粒」「異物」の調査基準があったものの、これらの調査内容の結果は両方の区において「0%」の結果が出ていた。

食味に関する調査項目（タンパク質含有率・アミロース含有率・脂肪酸度）は慣行区とバイオチャー区の間には 5%の有意水準での有意差は見られず、さらに両処理区ともに 1 等米に準ずる高いスコア結果を出しておりこちらも 5%の有意水準での有意差は見られなかった。

4-2-3 土壌間隙水

各土壌水の NO_3^- -N、 NH_4^+ -N の結果を図 21 と 22 に示した。燻炭なし区（対照区）の NO_3^- -N は 5 月 19 日に平均濃度が最も高くなり 0.06mg/L を示した。それ以降は、徐々に少し減少していた。燻炭ありの区（バイオ炭区）では、5 月 9 日・5 月 19 日・6 月 3 日・6 月 10 日・6 月 18 日・7 月 8 で、データのばらつきが大きく、平均濃度も燻炭なしの区画より高くなったが有意差が見られなかった。全体的に燻炭あり区は燻炭なし区を上回ることが多く、燻炭あり区画の NO_3^- -N は濃度が高くなる傾向を示した。

NH_4^+ -N は両区画で 5 月 9 日ではすべての調査区で 1mg/L 以下となっていたが、5 月 12 日の肥料散布後の 5 月 19 日のデータは、燻炭あり区で 11.0mg/L、燻炭なし区で 8.6mg/L の最大平均濃度まで増加した。5 月 19 日、5 月 27 日、6 月 3 日、6 月 10 日、6 月 18 日の両区画のデータはばらつきが大きく、平均濃度

は減少傾向を示した。中干し期間後の 7 月 8 日、7 月 21 日、8 月 11 日、8 月 17 日、9 月 2 日はすべての調査区で 0.5mg/L 以下になった。有意差は見られなかったが、中干し前の燻炭あり区の濃度は燻炭なし区を上回ることが多く、濃度は高くなる傾向を示した。

シリカは中干し前において燻炭あり区で高く燻炭なし区で低くなっていた。5 月 9 日・5 月 19 日・5 月 27 日・6 月 3 日・6 月 10 日ではマン=ホイットニーの U 検定で、5 月 19 日・5 月 27 日・6 月 3 日ではウェルチ法で有意差が示された（図 23）。今回の実験の稲の栽培では、シリカの肥料は加えていないため、籾殻燻炭の施用が土壌中のシリカ濃度を増加させたことを示した。

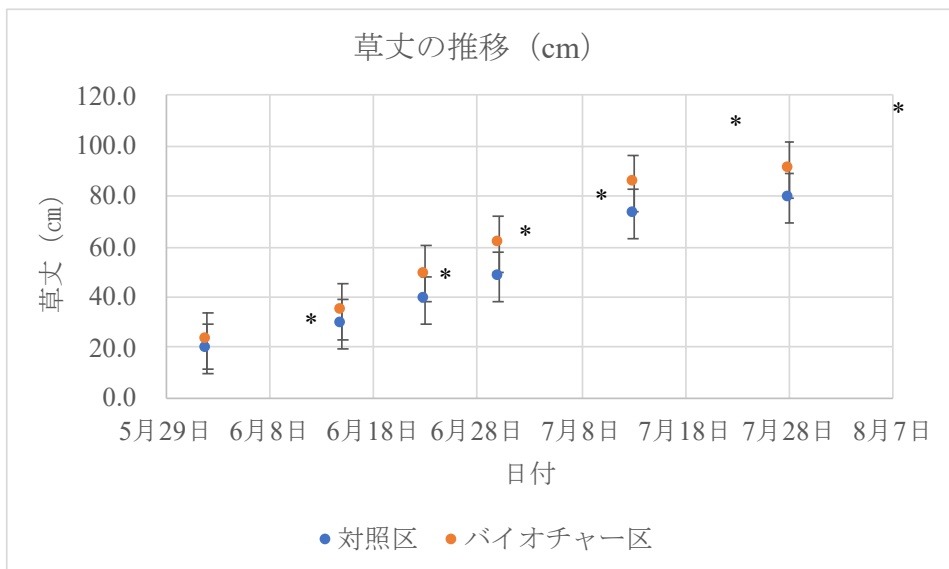


図 16 各処理区における草丈の推移

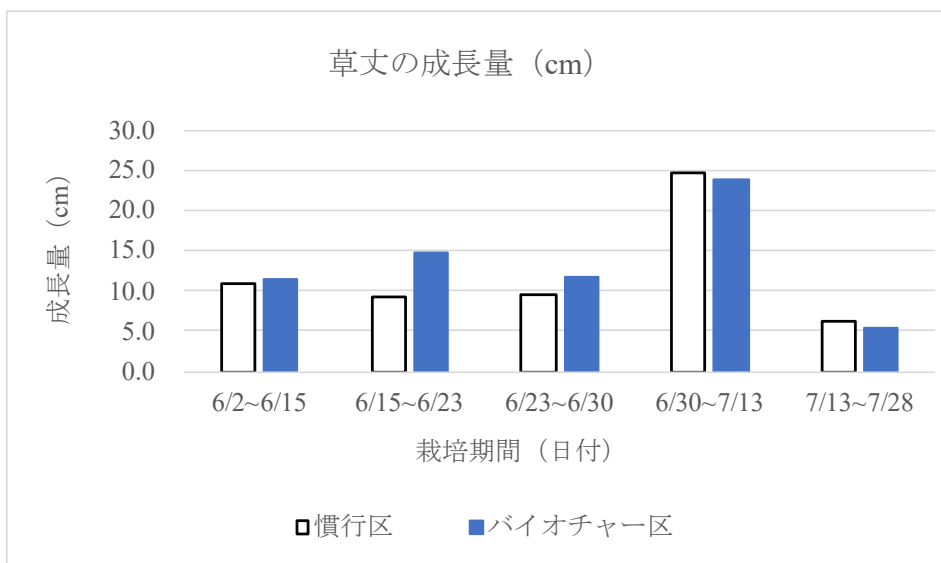


図 17 各処理区における一定期間ごとの草丈の成長

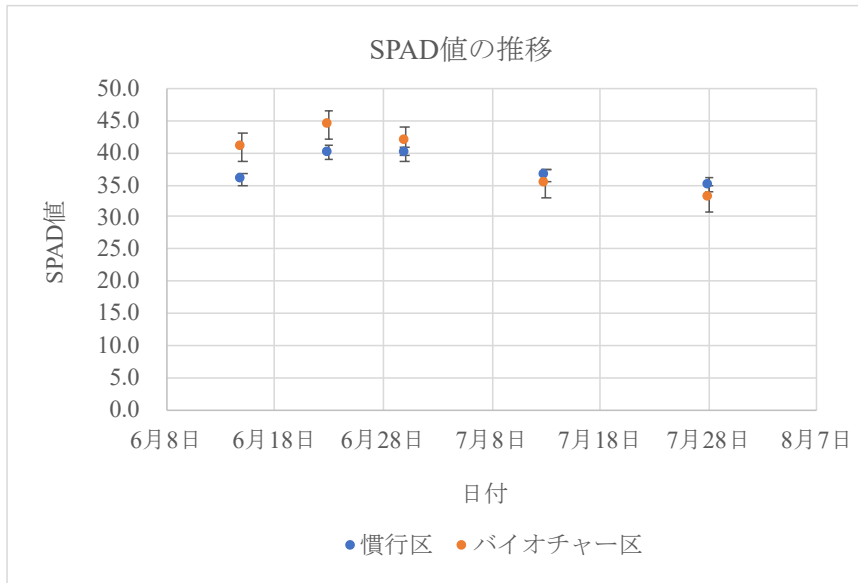


図 18 各処理区における SPAD 値の推移

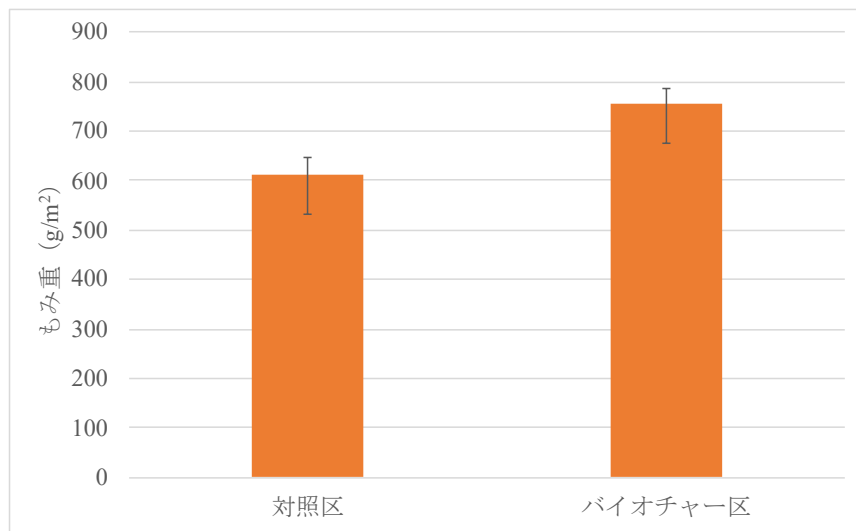


図 19 各処理区におけるもみ重

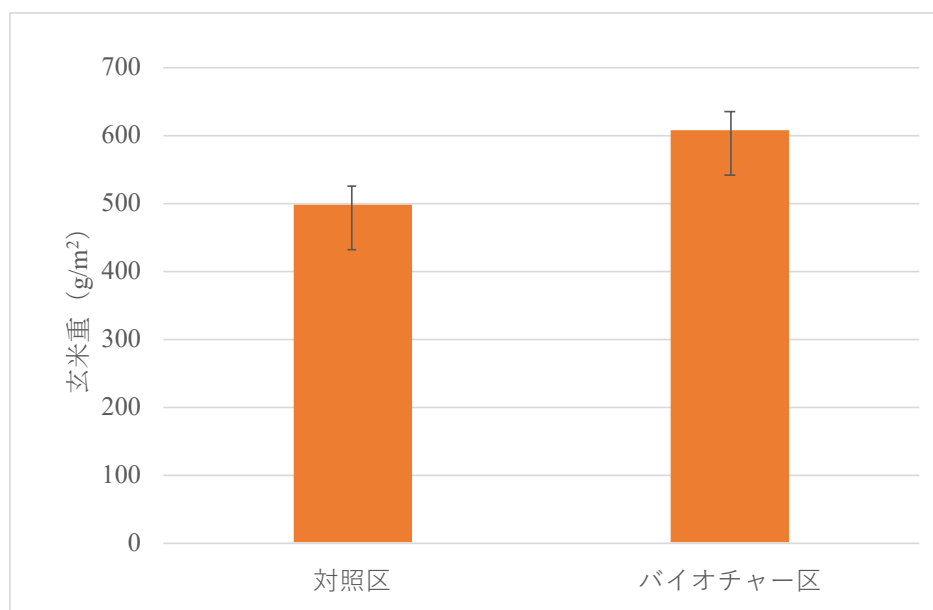


図 20 各処理区における玄米重

表 4 各処理区における品質

| | 整粒 (%) | 死米 (%) | 着色粒 (%) |
|---------|----------|---------|---------|
| 慣行区 | 78.4±2.0 | 1.4±0.2 | 0.04 |
| バイオチャー区 | 73.2±1.7 | 2.4±0.7 | 0.08 |
| 1等米の基準 | 70 以上 | 7.0 未満 | 0.1 未満 |

表 5 各処理区における食味値

| | タンパク (%) | アミロース (%) | 脂肪酸 (%) | 食味スコア (点数) |
|---------|----------|-----------|----------|------------|
| 慣行区 | 6.2±0.1 | 16.9±0.1 | 16.0±0.8 | 79±0.9 |
| バイオチャー区 | 6.3±0.1 | 16.9±0.1 | 17.2±0.6 | 78±1.1 |

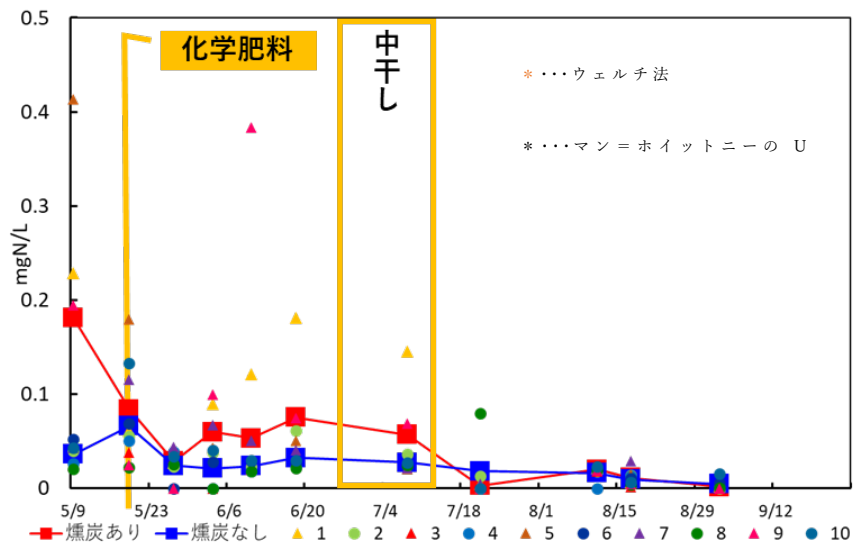
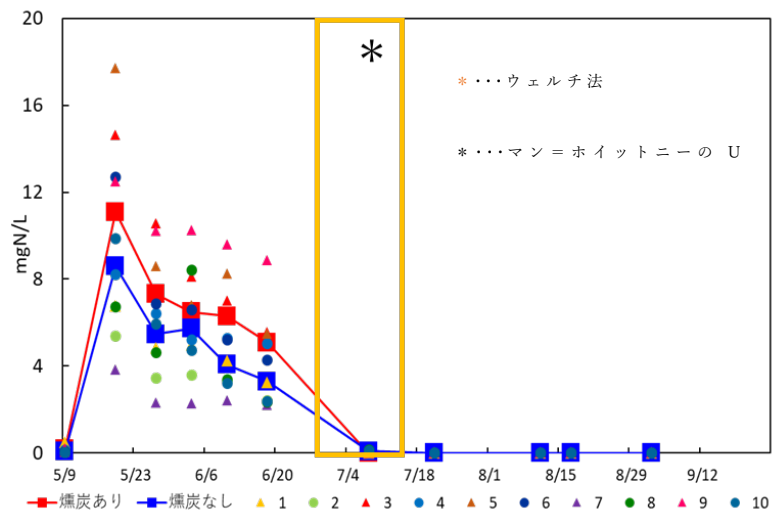


図 21 各処理区における土壌水中の NO_3 濃度



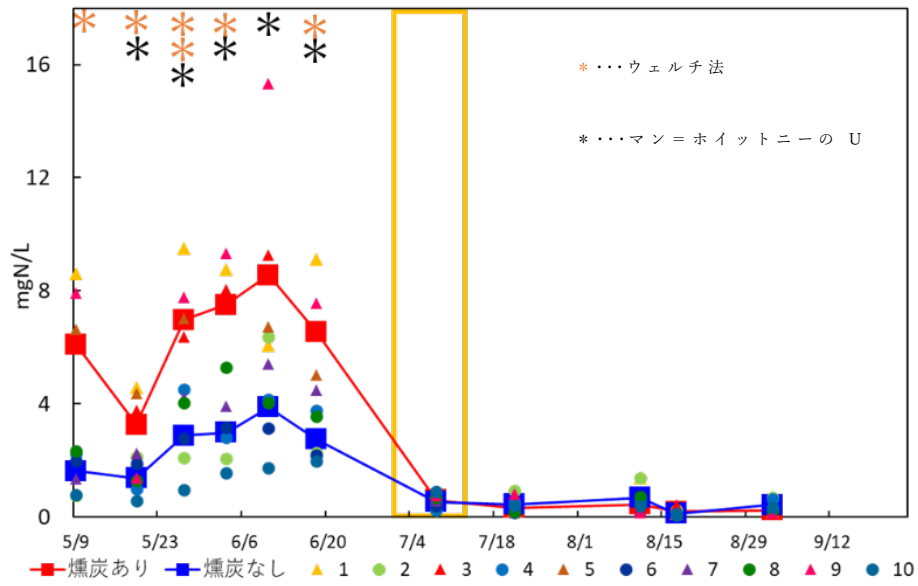


図 23 各処理区における土壌水中のシリカ濃度

第5章 まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のことが明らかになってきた。

- 1) 水田でのバイオ炭施用 (20t/ha 換算) は特に施肥量が少ない条件下 (滋賀県の環境こだわり農法レベル) で十分な玄米収量 (540g/m² 以上) をあげることが可能であり、且つ、食味や品質を 1 等米レベルで維持できる。
- 2) 低施肥量条件下ではバイオ炭を施用することで特に中干し前までの期間に土壌水中の NH₄-N 濃度が高まり、これがコメ増収に関係している可能性が高い。
- 3) 水田でのバイオ炭施用量は 8t/ha までであれば除草剤効果は対照区と同等であるが 16t/ha 以上になると急激に効果が低下すること。
- 4) バイオ炭の施用量に応じて炭素隔離効果は高まること。
- 5) バイオ炭施用は少なくとも 20t/ha までであれば水生生物の個体数や種数に悪影響を及ぼさないこと。

以上より、水田でのバイオ炭施用は減肥効果ももたらしてくれる環境に配慮した次世代型の水田稲作農法として活用できる可能性が高いことが示された。また、今回得られた結果をもとに水田でのバイオ炭活用法を考えると以下のような条件が妥当だと言える。

- ・バイオ炭 (籾殻くん炭) の施用量は 10t/ha までとする
- ・施肥量は窒素ベースで 4kg/10a までとする
- ・その他は慣行法に準じて栽培を行う

ただし本研究で十分に検証できなかった以下のような懸念点も挙げられる。

- ・どのぐらいの頻度でバイオ炭を施用することが妥当か
- ・施用したバイオ炭はどのぐらいの期間水田に残存し続けるのか
- ・バイオ炭の施用量が累積値として 16t/ha を越えると除草剤効果は低減してしまうのか

まず、一点目の懸念点だが、バイオ炭（籾殻くん炭）を 10t/ha 換算で水田に施用する頻度については水田で排出される廃棄物（イナワラや籾殻）を活用して持続することが理想的である。本研究では水田から排出されるイナワラや籾殻を利用してバイオ炭を作出し 10t/ha 換算で水田に施用することは 2～3 年に 1 回の頻度で可能であることが示された。よって理想的には 3 年に 1 回のペースでバイオ炭を 10t/ha 換算で水田に施用することになる。ただし、これらは 2 つ目および 3 つ目の懸念点に直結する。本研究では施用したバイオ炭は少なくとも数年間はほぼ全量が水田土壌に残存することが示された。つまり、3 年に 1 回のペースでバイオ炭を施用するとバイオ炭の蓄積量が右肩上がりに増加していく可能性が高く 3 つ目の懸念点である除草剤効果の低下につながる恐れがある。これについては今後の大きな課題と言えよう。

また、水田でのバイオ炭施用を社会実装していくためには正味の炭素固定量である生態系純生産量（NEP）をバイオ炭施用の有無で定量的に評価することが不可欠である。仮にバイオ炭施用の有無で水田の NEP がそれほど変わらないのであれば正味の炭素固定量はバイオ炭施用量に依存することになる。これらについても今後の大きな課題の一つと言えよう。

謝辞

玄米の食味や品質分析では滋賀県農業技術振興センターの中橋様、吉田様には大変お世話になりました。改めて感謝申し上げます。また、本研究で示したデータは多くの学生と協力して得たものであります。各テーマに関わっていただいた学生諸君に心から感謝いたします。

【参考文献】

- (1) Lehman et al. (2003) Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant soil* 249, 3343-357.
- (2) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021), 2019年 IPCC 改良ガイドライン, 第4巻 (第2章, Appendix 4), IPCC ホームページ <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>.
- (3) 渡邊彰・平舘俊太郎 (2013) 土と炭化物-炭素の隔離と貯留-, 博友社.
- (4) 岸本 (莫) 文紅 (2019) バイオ炭の農業利用と脱炭素～国内外の動向と今後の展望, 日本 LCA 学会誌.
- (5) 滋賀県農業技術振興センター (2013) 水稲新品種「みずかがみ」の環境こだわり米栽培技術指針.
- (6) Qianqian et al. (2020) Temporal physicochemical changes and transformation of biochar in a rice paddy: Insights from 9-year field experiment. *Science of the Total Environment*, 721, 137670.
- (7) 滋賀県 (2018) 農業経営ハンドブック-農業経営発展に向けた経営指標集-, 滋賀県
- (8) 農林水産省 (2021) 令和3年農業物価統計 <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noubukka/h27/index.html> (2022年12月5日アクセス) .