Final Research Report of the Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

研究区分	：	環境問題対応型研究（カーボンニュートラル枠）
研究実施期間	：	2022（令和４）年度～2024（令和６）年度
課題番号	：	1CN-2207
体系的番号	：	JPMEERF20221C07
研究課題名	：	林地へのバイオ炭施用によるCO2 放出の削減と生態系サービスの強化に関する研究
Project Title	：	Reduction of CO2 Emission and Boost of Ecosystem Services by Applying Biochar to Forest Ecosystems
研究代表者	：	吉竹　晋平
研究代表機関	：	早稲田大学
研究分担機関	：	岐阜大学、神戸大学
キーワード	：	バイオ炭、森林生態系、炭素循環、炭素隔離、土壌

2025（令和７）年５月

目次

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書 1
研究課題情報 3
＜基本情報＞ 3
＜研究体制＞ 3
＜研究経費＞ 4
＜研究の全体概要図＞ 5
１．　研究成果 6
１．１．　研究背景 6
１．２．　研究目的 7
１．３．　研究目標 7
１．４．　研究内容・研究結果 8
１．４．１．　研究内容 8
１．４．２．　研究結果及び考察 10
１．５．　研究成果及び自己評価 14
１．５．１．　研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 14
１．５．２．　研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価 15
１．６．　研究成果発表状況の概要 18
１．６．１．　研究成果発表の件数 18
１．６．２．　主要な研究成果発表 18
１．６．３．　主要な研究成果普及活動 19
１．７．　国際共同研究等の状況 19
１．８．　研究者略歴 19
２．　研究成果発表の一覧 20
（１）　研究成果発表の件数 20
（２）　産業財産権 20
（３）　論文 20
（４）　著書 21
（５）　口頭発表・ポスター発表 21
（６）　「国民との科学・技術対話」の実施 25
（７）　マスメディア等への公表・報道等 26
（８）　研究成果による受賞 26
（９）　その他の成果発表 26
権利表示・義務記載 26

Abstract

研究課題情報

＜基本情報＞

研究区分：	環境問題対応型研究（カーボンニュートラル枠）
研究実施期間：	2022（令和４）年度～2024（令和６）年度
研究領域：	統合領域
重点課題：	【重点課題 2】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発 【重点課題 7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
行政ニーズ：	非該当
課題番号：	1CN-2207
体系的番号：	JPMEERF20221C07
研究課題名：	林地へのバイオ炭施用による CO2 放出の削減と生態系サービスの強化に関する研究
研究代表者：	吉竹　晋平
研究代表機関：	早稲田大学
研究分担機関：	岐阜大学、神戸大学、国立環境研究所、滋賀県立大学、玉川大学
研究協力機関：	

＜研究体制＞

サブテーマ１「落葉落枝等からのバイオ炭の作出とポット栽培を用いた短期的な生態系応答の解明」

＜サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	早稲田大学	教育･総合科学学術院	准教授	吉竹晋平	
分担者	玉川大学	農学部環境農学科生態系科学領域	准教授	友常満利	

サブテーマ２「バイオ炭施用に伴う中長期的な生態系の応答性と炭素隔離機能の定量的評価」

＜サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	岐阜大学	環境社会共生体研究センター	教授	大塚俊之	

分担者	国立研究開発法人国立環境研究所	環境リスク･健康領域	主任研究員	近藤美由紀	
研究協力者	国立研究開発法人国立環境研究所	地域環境保全領域	主任研究員	篠原隆一郎	令和4年4月～令和6年3月
研究協力者	岐阜大学	環境社会共生体研究センター	助教	篠塚賢一	令和6年4月～令和7年3月

サブテーマ３「バイオ炭施用に伴う中長期的な土壌圏の応答性とレジリエンス機能の定量的評価」

＜サブテーマリーダー（STL)、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	神戸大学	大学院農学研究科生命機能科学専攻	教授	藤嶽暢英	
分担者	滋賀県立大学	環境科学部生物資源管理学科	講師	飯村康夫	
研究協力者	国立研究開発法人国立環境研究所	地域環境保全領域	主任研究員	篠原隆一郎	令和4年4月～令和6年3月
研究協力者	岐阜大学	環境社会共生体研究センター	助教	篠塚賢一	令和6年4月～令和7年3月

＜研究経費＞

＜研究課題全体の研究経費（円）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	29,950,000	8,983,000	38,933,000	38,933,000
2023	24,681,000	7,402,000	32,083,000	32,083,000
2024	20,270,000	6,081,000	26,351,000	26,351,000
全期間	74,901,000	22,466,000	97,367,000	97,367,000

＜研究の全体概要図＞

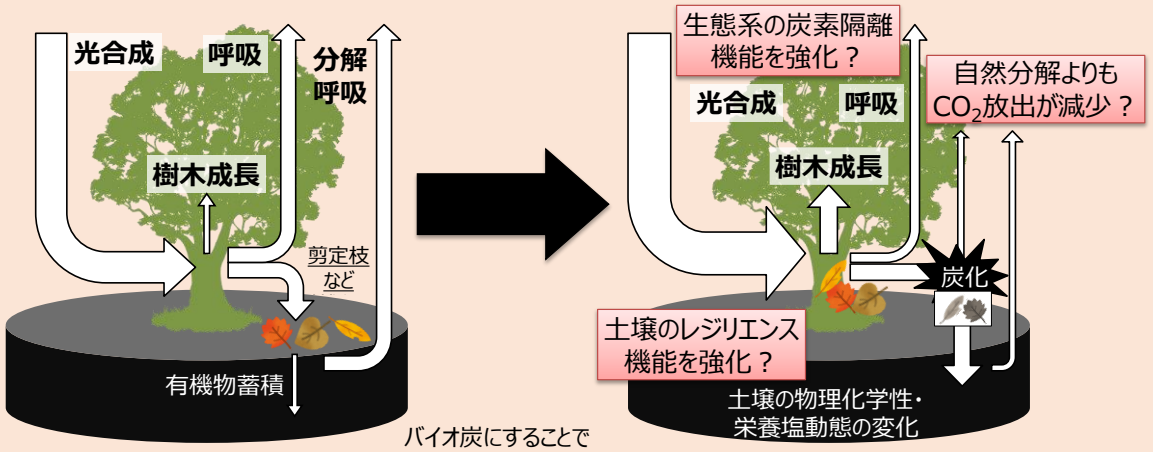
林地へのバイオ炭施用によるCO_2放出の削減と生態系サービスの強化に関する研究

概略図

バイオ炭を用いた新たな炭素隔離方策の提案

カーボンニュートラルに貢献
里山の維持・再生に貢献

里山・林地の剪定枝等をバイオ炭に変換し、現地の土壌へ施用する



剪定枝等に含まれる炭素の大部分は本来は分解されて短期的にCO_2となる → バイオ炭にすることで → **CO_2放出の削減**・**生態系サービスの強化** を期待

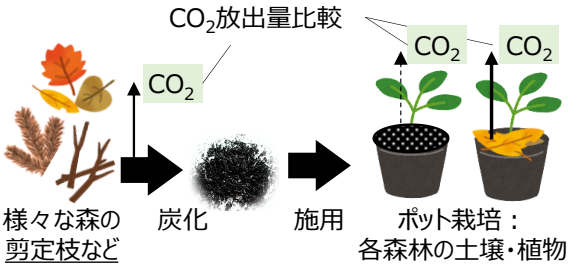
森林タイプによって効果は異なる？

サブテーマ１（早稲田大・玉川大）

CO_2放出削減効果の定量的評価

森林タイプの違いによる影響の解明

- 様々な森の剪定枝等からバイオ炭を作出
- ポット栽培で**短期的な生態系応答**を解明
- CO_2放出量を算出・比較



サブテーマ２（岐阜大・環境研）

生態系の炭素隔離機能（NEP）の変化を定量的に評価

- 生態系炭素・窒素循環の変化を解明
- 生産（NPP）と分解（HR）から**炭素隔離機能（NEP）**を算出

サブテーマ３（神戸大・滋賀県大）

土壌のレジリエンス機能（緩衝能）の変化を定量的に評価

- 炭素賦存量の変化を解明
- 温暖化、N添加処理への応答性解析
- 土壌の**化学的・物理的緩衝能**を測定

2015年にバイオ炭を施用した林地を継続調査 → 長期応答の解明

1．　研究成果

1．1．　研究背景

カーボンニュートラル社会の実現には、化石燃料消費量を減らしてCO_2放出を削減させるだけでなく、すでに大気中に放出された多量のCO_2を吸収・固定する様々な炭素隔離方策を検討していくことが必要である。これを受けて、大気中のCO_2除去（CDR: Carbon Dioxide Removal）とそれを可能にするネガティブエミッション技術（NETs: Negative Emission Technologies）の開発・検討が進んでいるが（CRDS, 2022）、IPCC 第５次報告書では、気候変動緩和のための低コストの炭素隔離技術としてバイオ炭（biochar、バイオチャーとも）の利用が挙げられた。バイオ炭は有機物を低酸素かつ比較的低温条件下で炭化させ、土壌改良等を目的に土壌に施用されるものである。炭化によって有機物が難分解化しているため、バイオ炭を土壌に施用することにより、バイオ炭自体が数百年から数千年に渡って長期間土壌に残存するという、直接的な炭素隔離効果が見込まれている。加えて、バイオ炭が持つ様々な土壌改良効果によって植物成長が促進されたり、土壌有機物が安定化したりすることを介して、生態系に元来備わっている生態系サービスの１つである炭素隔離機能（CO_2吸収・貯留能力）を強化するという、間接的な炭素隔離効果も期待できる（Tanazawa et al., 2021）。

バイオ炭は古くから農業用の土壌改良用資材として用いられてきたため、バイオ炭を用いた炭素隔離の検討もまた、農地を中心に行われてきた。特にIPCCの2019年方法論報告書においては、バイオ炭が農地土壌の炭素貯留に及ぼす影響を算定する方法が記載された。また、2020年9月には、温室効果ガスの排出削減量や吸収量をクレジットとして国が認証する「J－クレジット制度」において農地へのバイオ炭施用が認証され、バイオ炭を用いた事業による温室効果ガス排出削減量をクレジットとして売買することが可能になった。これを受けて農地ではバイオ炭の活用が進み、現地の有機物残渣から作成したバイオ炭をその場に戻して炭素隔離を進める試みも始まっている。また、バイオ炭の農地施用を通して、世界の土壌表層の炭素量を年間0.4%（4パーミル）増加させることで、人間の経済活動によって増加する大気中のCO_2を実質ゼロにすることができるという考え方（4パーミル・イニシアチブ）に貢献しようという動きも活発化している。

一方、森林が国土の6割以上を占める我が国では、これまで森林を重要な炭素吸収源に位置づけ、2021年10月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」においても森林吸収源対策に取り組むこととしてきた。そのためには、バイオ炭を用いた炭素隔離技術について、実際の森林での実証試験を通して、その有効性や効果を定量的に示すことが重要であると考えられた。なお、その後2025年2月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」では「2050年ネット・ゼロの実現に向け、2035年度および2040年度における温室効果ガスを2013年度比でそれぞれ60%、73%削減する」という野心的な目標が掲げられており、その達成に向けては森林におけるバイオ炭を用いた炭素隔離方策の実証を急ぐ必要があるだろう。

しかし、農作物の収量増加を目的に古くからバイオ炭の施用が行われてきた農地に比べると、森林へバイオ炭を施用して科学的なデータを収集した例は世界的に見ても非常に少なく、その知見は北方林（Palviainen et al., 2018; Zhao et al., 2019）や竹林（Ge et al. 2020; Xu et al. 2020）に偏っている。したがって、温帯林においてバイオ炭が森林生態系の各要素（植物、土壌、微生物など）や、生態系機能（炭素吸収、栄養塩循環など）に及ぼす影響は未知であった。我々は以前からバイオ炭による土壌への炭素隔離について関心を持っており、2015年には落葉広葉樹二次林（埼玉県本庄市のコナラ二次林）にバイオ炭を大規模に施用する研究を開始して生態系の応答を調べており、短期的には樹木の光合成や成長が促進されることなどを報告してきた（科研費15H01730、19H04237）（Tanazawa et al., 2021; Ohtsuka et al., 2021）。しかしこれらの研究を経ても、生態系に元来備わっている炭素隔離機能などの生態系サービスに対してバイオ炭施用が及ぼす長期的な影響や、その変化のメカニズム、森林タイプによる応答性の違いなどについては未解明であり、林地でのバイオ炭施用を検討するためにはさらなる研究の継続・発展が必要であると考えられた。

また、森林国である我が国では、古くから森林を里山・人工林として適切に利用することにより、森林が持つ様々な生態系サービスを維持・享受してきた。しかし近代以降、里山・人工林の放棄・荒廃や利用低下（アンダーユース）により、これら森林の林床に未利用の有機物（枯死倒木や間伐木、剪定枝など）が蓄積したり、森林が本来有する炭素固定能や水源涵養能などの生態系サービスが低下したりという問題が起こっており（環境省, 2018）、これを解決するために新たな付加価値の提示による適切な森林管理の再開や、里山の積極的な利活用を推進する方策を考えることが求められていた。

【引用文献】
CRDS（2022）バイオマスをCO2吸収源としたネガティブエミッション技術（国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 調査報告書）.
Ge, X., Cao, Y., Zhou, B., Xiao, W., Tian, X., & Li, M.H. (2020) Combined application of biochar and N increased temperature sensitivity of soil respiration but still decreased the soil CO_2 emissions in moso bamboo plantations. Science of Total Environment 730: 139003.
環境省（2018）生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書.
Ohtsuka, T., Tomotsune, M., Ando, M., Tsukimori, Y., Koizumi, H. & Yoshitake, S. (2021) Effects of the application of biochar to plant growth and net primary production in an oak forest. Forests 12: 152.
Palviainen, M., Berninger, F., Bruckman, V.J., Köster, K., de Assumpção, C.R.M., Aaltonen, H., Makita, N., Mishra, A., Kulmala, L. & Adamczyk, B. (2018) Effects of Biochar on Carbon and Nitrogen Fluxes in Boreal Forest Soil. Plant Soil 425: 71-85.
Tanazawa, Y., Tomotsune, M., Suzuki, T., Koizumi, H., & Yoshitake, S. (2021) Photosynthetic response of young oaks to biochar amendment in field conditions over 3 years. Journal of Forest Research 26: 116-126.
Xu, L., Fang, H., Deng, X., Ying, J., Lv, W., Shi, Y., Zhou, G., & Zhou, Y. (2020) Biochar application increased ecosystem carbon sequestration capacity in a moso bamboo forest. Forest Ecology and Management 475: 118447.
Zhao, P., Palviainen, M., Köster, K., Berninger, F., Bruckman, V.J. & Pumpanen, J. (2019) Effects of biochar on fluxes and turnover of carbon in boreal forest soils. Soil Science Society of America Journal 83: 126-136.

１．２．　研究目的

上記のような背景を踏まえ、我々は里山林等の森林に蓄積している未利用有機物をバイオ炭に変換して元の森林に施用することにより、森林管理の再開・促進を促して我が国の森林が抱えるアンダーユースの問題を解決しつつ、バイオ炭による長期的・安定的な炭素隔離が可能になるのではないかと考えるに至った。そこで本研究課題では、このような里山林等を対象としたバイオ炭施用事業の有効性および実現可能性を検証するために必要な科学的知見、すなわちバイオ炭を用いた際のCO_2排出削減効果や、バイオ炭施用後の森林の生態系サービスの変化などに関する定量的データを取得することを目的とした。

本研究課題は、森林のアンダーユースという問題と気候変動対策の両者に対して、「バイオ炭」を核としてアプローチするものである。これは地域循環共生圏の構築に必要とされる、分野・領域横断的な取組であり、重点課題２「ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発」に対応するものである。

また本研究課題の中心であるバイオ炭は、低コストな炭素隔離技術として有望視されているが、実際の森林での検証例はほとんどないため、本研究課題で得られる成果は世界的に見ても貴重なものとなる。この点から本研究課題は、重点課題７「気候変動の緩和策に係る研究・技術開発」にも対応している。

１．３．　研究目標

＜全体の研究目標＞

研究課題名	林地へのバイオ炭施用によるCO_2放出の削減と生態系サービスの強化に関する研究
全体目標	林地で発生する様々な有機物残渣を原料としたバイオ炭を作出し、自然分解と比較した際のCO_2放出の削減効果を算出する。また、バイオ炭を施用したときの生態系の短期的応答について、バイオ炭の種類や土壌の違いが与える影響を評価する。さらに、実際の林地へのバイオ炭の施用が、生態系の各構成要素および生態系サービス（炭素隔離機能やレジリエンス機能）に及ぼす中長期的影響を定量的に評価する。

＜サブテーマ１の研究目標＞

サブテーマ１名	落葉落枝等からのバイオ炭の作出とポット栽培を用いた短期的な生態系応答の解明
サブテーマ１実施機関	早稲田大学、玉川大学
サブテーマ１目標	複数の森林サイトで得られる剪定枝などを原料としてバイオ炭を試験的に作出し、収率や野外での分解率等のデータをもとに、これら有機物残渣が林床で自然分解した場合に比べてどの程度CO_2放出削減効果があるかを評価する。また、得られたバイオ炭と現地の土壌を用いたポット栽培実験により、それぞれのバイオ炭が生態系の各要素に与える短期的な影響を定量的に評価する。

＜サブテーマ２の研究目標＞

サブテーマ２名	バイオ炭施用に伴う中長期的な生態系の応答性と炭素隔離機能の定量的評価
サブテーマ２実施機関	岐阜大学、国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ２目標	2015年にバイオ炭施用を行った落葉広葉樹二次林では、短期的にはリター分解と樹木種子生産の両方の増加が認められた。これらは炭素隔離機能（Net ecosystem production; NEP）に対して正反対の効果をもたらす。しかし、細根生産を含めたNEPの定量的評価と、中長期的な応答性についてはまだ解答が得られていない。本サブテーマでは、バイオ炭施用が土壌中の栄養塩動態に与える変化を通して、森林生態系のNEPに与える中長期的な効果を野外で定量的に評価する。

＜サブテーマ３の研究目標＞

サブテーマ３名	バイオ炭施用に伴う中長期的な土壌圏の応答性とレジリエンス機能の定量的評価
サブテーマ３実施機関	神戸大学、滋賀県立大学
サブテーマ３目標	2015年にバイオ炭施用を行った森林研究サイトを用いて、施用に伴う中長期的な土壌圏の応答性（炭素賦存量、水分などの物理性、栄養塩などの化学性などにおける変化）を定量的に解明する。また、急激な環境変動ストレスに対する土壌のレジリエンス機能（物理的・化学的緩衝作用）について、バイオ炭施用による増強効果を定量的に評価し、作用機構の解明を試みる。

１．４．　研究内容・研究結果

１．４．１．　研究内容

この研究課題では、2015年にバイオ炭施用実験を開始した落葉広葉樹二次林（コナラ二次林）を中心的な研究サイトとし、そこでの生態系の各要素（植物、土壌、土壌微生物、水、栄養塩など）と生態系機能（炭素隔離機能、土壌レジリエンス機能）に対するバイオ炭の中長期的（～８年）な影響について、定量的な評価を行った。なお、ここでの「土壌のレジリエンス機能」とは、急激な環境変動で土壌が被る様々な影響を緩和し、定常状態を維持・回復できる機能と定義した。また、森林タイプが異なるとバイオ炭の影響も異なる可能性を考慮し、複数タイプの森林を模したポット栽培を実施し、バイオ炭施用が生態系に及ぼす短期的影響を定量的に評価した。さらに、「森林に放置されている枯死木や剪定枝などの未利用有機物を原料としてバイオ炭を作出し、元の森林の林床に施用するという事業」を想定し、その社会実装に向けて必要となる各工程での基礎データ（未利用有機物の現存量、簡易炭化炉での収炭率・炭化率、作出したバイオ炭の自然分解過程など）の収集と、本事業全体での包括的な炭素収支の評価を行った。

【サブテーマ１】

我が国に広く分布するいくつかの森林タイプを想定し、各森林で生じる有機物残渣（本来は自然分解によって比較的短期間でCO_2になると考えられる、枯死倒木、間伐木、剪定木などの粗大木質有機物（Coarse Woody Debris: CWD））を原料としてバイオ炭を作出し、それを林地に戻した際のCO_2排出削減効果を定量的に評価することを目指した。また、複数の森林タイプを模したポット栽培実験により、バイオ炭施用が生態系に与える短期的な影響を評価することとした。そのためサブテーマ１では、（１）実際の森林におけるCWD現存量の把握、（２）簡易炭化炉を用いたCWDの炭化方法の検討と作出されたバイオ炭の性状評価、（３）CWDウッドチップおよびバイオ炭の林床での分解速度の比較、（４）複数の森林を模したポット栽培実験によるバイオ炭が生態系に及ぼす短期的影響の解明を行った。また、当初研究計画にはなかったが、サブテーマ１および２の連携により必要なデータの蓄積が順調に進んだことから、バイオ炭原料（CWD）から炭化工程、そして森林に施用した後の生態系の応答（炭素収支の変化）までをすべて考慮して、（５）ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）による包括的な炭素収支の検討にも取り組んだ。

（１）のCWD現存量の把握では、コナラ林、アカマツ林、スギ林においてCWD現存量調査を行い、その分布や現存量を明らかにした。

（２）炭化方法の検討では、各樹種のCWDを材料として簡易炭化炉を用いてバイオ炭を作出し、収炭率や炭化率のデータを得た。また、得られたバイオ炭の組成分析や、比表面積および全細孔容量の測定、電子顕微鏡観察を行った。

（３）のバイオ炭分解速度については、リターバッグ法を用いて林床での重量減少速度を調べた。また、リターバッグ下方への浸透水を採取・分析することで、その間に流出する溶存態有機炭素（Dissolved Organic Carbon: DOC）フラックスを定量した。

（４）のポット栽培実験では、コナラ林、アカマツ林、スギ林を模したポットを用意し、そこに各樹種のCWDから作出したバイオ炭を施用して、土壌特性、植物成長、純生態系生産量（Net Ecosysystem Production: NEP）、土壌炭素フラックス（土壌呼吸（Soil Respiration: SR）および従属栄養生物呼吸（Heterotrohpic Respiration: HR））などの短期的応答を解析した。

最後に発展的取組として（５）のLCAによる包括的な炭素収支の検討に取り組んだ。本研究課題で得られた現地データおよび利用できる文献値を組み合わせた試験的なLCAを行い、「CWDを原料としたバイオチャーの作製とその森林への散布」による一連の炭素排出・炭素隔離を定量化した。そして、CWDを林床に放置して自然分解するケース（カーボンニュートラル）に対し、バイオ炭による炭素隔離シナリオでは化石燃料消費によるCO_2放出を差し引いた上でどれくらいの炭素が生態系に隔離されるのか（正味の炭素隔離量、カーボンネガティブ）を評価した。

【サブテーマ２】

実際の森林へのバイオ炭施用が、森林に本来備わっている炭素隔離機能（NEP）に中長期的にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目指した。2015年にバイオ炭の施用実験（10 ton ha^{-1}）を開始した落葉広葉樹二次林（コナラ二次林、埼玉県本庄市）を調査地として、バイオ炭施用区と対照区（無施用区）において生態学的手法によりNPP、HR、NEPを明らかにした。また2019年には細根の直接的観察のための細根調査区を、2022年にはバイオ炭施用直後の細根と土壌栄養塩動態への影響を調べるための新実験区が設けられ、それぞれの実験区にバイオ炭施用区（10 ton ha^{-1}）が設定された。

NPPは、（i）毎木調査における胸高直径の変化とアロメトリー式から求めた樹木木部の生産量、（ii）リタートラップ法により求めた樹木の当年性の地上部リター量（=葉と生殖器官の生産量）、（iii）サンプリング法およびスキャナ法を併用して推定した樹木細根の生産量、（iv）刈り取り法により求めた下層植生（ササ）の生産量の年間量の総和として求めた。一方HRについては、トレンチ法を用いて測定した。

サブテーマ２では、バイオ炭施用がNEPに影響を及ぼすメカニズムとして、バイオ炭施用が窒素（N）動態に及ぼす影響について定量的評価を行った。林内雨・林外雨による各種イオンのフラックスを定量し、その結果から本研究調査地へのN沈着量と、林冠収支モデルを用いた乾性沈着と葉面吸収を推定した。また、土壌中の無機態N量の変化と、レジンコア法を用いた一定期間におけるN無機化速度を測定した。

以上の結果から、植物によるN要求量とN供給量の推定を行った。植物バイオマス生産に必要な総N要求量は、植物のNPPに各器官のN濃度を乗じて計算した。樹木のN吸収としては、土壌からの無機態窒素の吸収と落葉する葉からの回収、そしてすでに述べた葉面吸収の３つを考慮した。

【サブテーマ３】

バイオ炭施用によって（１）土壌圏の諸特性と（２）生態系サービスの１つでもある土壌のレジリエンス機能（化学的・物理的緩衝能）が中長期的にどう変化するのかを定量的に評価することを目指した。サブテーマ２同様に実際の森林にバイオ炭を施用したコナラ二次林を調査地とし、主に2015年区（施用後７年目）、2022年区（施用後1年目）を対象に研究を行った。

（１）の土壌圏の諸特性の変化については、バイオ炭施用が、（i）土壌炭素賦存量、（ii）微生物バイオマス・群集構造、（iii）土壌浸透水のフラックスおよび土壌溶液特性、そして（iv）鉱質土層の一般物理化学性に及ぼす影響について評価した。（i）の土壌炭素賦存量については、地表～5 cm深サンプル（リター層を含む）と鉱質土層0～15 cm深サンプルについて、それぞれ炭素含有量を測定して算出した。（ii）の微生物バイオマス・群集構造については、微生物細胞膜主成分であるリン脂質脂肪酸（PhosphoLipid Fatty Acid: PLFA）を指標として解析した。PLFAの全量および組成を、それぞれ微生物バイオマスおよび群集構造の指標とした。（iii）の土壌浸透水フラックスは、土壌水分プロファイルセンサーの深さごとの体積水分率（Volumetric Water Content: VWC）の変化から算出した。また、土壌溶液を採取し、pH、各種イオン濃度、有機態炭素量を測定した。（iv）については、pH、全N含量、有効態リン酸、陽イオン交換能（Cation Exchange Capacity: CEC）などを測定した。

（２）の土壌レジリエンス機能の変化については、バイオ炭施用が（i）物理的緩衝能（水分・温度）と（ii）化学的緩衝能（pH・栄養塩保持）に及ぼす影響を評価した。（i）物理的緩衝能に関しては、バイオ炭施用から1年半の間の土壌含水率（表面～5 cm、毎月測定）および地温（鉱質土層2 cm深さ、連続測定）の変化から解析を行った。（ii）の化学的緩衝能のうち、pH緩衝能については、先行研究（Shi et al. 2018）に示された方法の条件検討・改良を行った上で測定を行った。栄養塩保持については、上記（１）（iv）で得られたCECと延期飽和度の解析結果からの評価を試みた。サブテーマ３ではさらに、（iii）環境変動（温暖化または高N負荷）に対抗する土壌レジリエンス機能が、バイオ炭施用の有無によって異なるかどうかを検証した。コナラ二次林に高さ0.7 高の透明ビニールシートで周囲を囲んだ温暖化区と、1 m×1 mの方形区の窒素添加区をそれぞれ設置することで温暖化および高N負荷状況を再現し、土壌水分および地温のモニタリングを行った。

１．４．２．　研究結果及び考察

【サブテーマ１】

（１）実際の森林におけるCWD現存量の把握【関連する主な研究成果：研究成果7】

わが国に広く分布するコナラ林、アカマツ林、スギ林を対象として調査を行った結果、森林林床においてCWDは集中分布していること、乾燥重量でおよそ10-25 ton ha^{-1}、炭素換算でおよそ5-12 ton C ha^{-1}に相当するCWDが存在することが示された。またこの値は温帯域の先行研究の値と比べて妥当な値であった（Kim et al. 2006; Yang et al. 2007）。CWD現存量（特に炭素換算値）を報告している例は多くはなく、優占種や森林管理方法などによってもその値は変わりうるため、CWDをバイオ炭の原料として活用していくためには、引き続き様々な森林におけるCWD現存量のデータを収集することが必要である。

（２）簡易炭化炉を用いたCWDの炭化方法の検討と作出されたバイオ炭の性状評価
【研究成果7、10、11、13、56】

今回用いた開放型炭化炉と閉鎖型炭化炉を比較すると、閉鎖型型炭化炉の方が、平均収炭率および平均炭化率が開放型炭化炉よりも高い傾向にあり、データのばらつきも小さかった。また、閉鎖型炭化炉はチップ化の手間はかかるものの、炎や煙が少ない、より安全に炭化作業が行える、一度に多量のバイオ炭を作出できる、といったメリットがあった。

本研究で自作したバイオ炭は市販木炭に比べて揮発性成分がやや多い傾向がみられた。樹種によっても組成に違いがみられ、コナラCWDを材料とした場合には揮発性成分や灰分が比較的多いバイオ炭が得られた。走査型電子顕微鏡による観察ではCWDから作出したいずれのバイオ炭でも材料となった木材の微細構造が確認でき、簡易炭化炉を用いて多孔質のバイオ炭を作出できることがわかった。しかし、簡易炭化炉で炭化させたバイオ炭は、市販の木質バイオ炭に比べて比表面積、細孔容量ともに小さかった。この違いは、市販バイオ炭と自作バイオ炭の間の、材料および炭化温度等による違いであると考えられた。

（３）CWDウッドチップおよびバイオ炭の林床での分解速度の比較【研究成果27、33、82】

リターバッグ実験の結果、各樹種のCWDのウッドチップに比べて、それを原料に作られたバイオ炭では重量減少は極めて遅かった。リターバッグ設置後15か月経過時点におけるバイオ炭の重量残存率はコナラでは91%、アカマツ、スギでは98%以上であった。このことから、CWDをバイオ炭にすることにより、有機物分解が大きく抑制されることが確認できた。リターバッグ法の重量残存率から計算された炭素損失量に対するDOCフラックスの寄与を計算すると、ウッドチップではその寄与は非常に小さかったが（<10%）、CWDから作出したバイオ炭では炭素損失量自体が小さいため、相対的にDOCフラックスの寄与が大きくなった（29-60%）。リターバッグ法により求められた炭素損失からこのDOCによる流出分を除外したものを分解・無機化されて大気へ放出されたCO_2-C量とみなして算出すると、ウッドチップでは元々含まれていた炭素のうち25-

60%程度がこの期間に放出されていたのに対して、現地材バイオ炭ではその割合は10%未満であった。

（４）複数の森林を模したポット栽培実験によるバイオ炭が生態系に及ぼす短期的影響の解明
【研究成果9、20、26、49、52、53】

いずれの森林タイプにおいても、バイオ炭施用は鉱質土層の土壌物理化学性（pH、無機態N濃度、など）に有意な影響を及ぼさなかった。これはポットの上から施用したバイオ炭が直接接触するのは有機物層であり、鉱質土層に影響がまだ及んでいなかった可能性が考えられた。したがって、バイオ炭が直接接触する有機物層における物理化学性の変化に着目した研究が今後必要であると考えられた。

バイオ炭を施用したポットでは、有意な差では無かったものの、いずれの樹種においても植物体バイオマスが大きくなる傾向が見られた。また、バイオ炭を施用すると、ポットレベルのNEPも概して増加していた。一方、いずれの樹種においても、バイオ炭の施用は微生物バイオマスや呼吸活性、HRに有意な影響を及ぼさなかった。これらの結果から、バイオ炭の施用は様々な森林において生態系の炭素吸収（NEP）を促進して植物バイオマスの増加させる一方、土壌中の有機物分解に伴うCO_2放出に与える影響は限定的であったことを示している。したがって、森林のCWDからバイオ炭を作出して森林に施用することは、樹木の成長や生態系の炭素循環に負の影響を与えず、炭素隔離のための方策として有効であることが示された。

（５）LCAによる包括的な炭素収支の検討【研究成果25、41、45、81】

コナラ林二次林をモデルとして、CWDをそのまま放置した場合とバイオ炭に変換した場合それぞれについてLCAを行った。本研究で対象としたコナラ二次林におけるCWD現存量は4.48 ton C ha^{-1}であったので、そのCWDをそのまま放置して100年間で全てが自然分解するシナリオでは、炭素隔離量は0 ton C ha^{-1}、炭素排出量は4.48 ton C ha^{-1}である。これに対して閉鎖型炭化炉を用いて炭化を行うシナリオでは、炭素排出量の合計が2.34-2.51 ton C ha^{-1}で、そのうち化石燃料由来の炭素排出が占める割合は非常に小さかった（<8%）。一方、バイオ炭の残存による炭素隔離と生態系応答（NEP増加）による炭素隔離を合わせた炭素隔離量は合計で2.23 ton C ha^{-1}であり、化石燃料由来の炭素排出を差し引いた正味の炭素放出量は2.04-2.21 ton C ha^{-1}と見積もられた。以上の結果から、化石燃料由来の炭素排出を考慮してもなお、CWDを林床に放置せずにバイオ炭に変換して生態系に施用する方が炭素隔離効果は高いことが明らかとなった。具体的には、1 haのコナラ二次林に存在するCWDを閉鎖型炭化炉によってバイオ炭にして森林に戻すことにより、約2トンの炭素固定が可能であることが示された。今回のLCAは予備検討的な位置づけであり、また炭素隔離の面からのみの評価であったが、今後は機器・道具の購入コストやランニングコストという経済面、そして労力面をも考慮した総合的な検討を行う必要があると考えられる。

【サブテーマ２】

（１）バイオ炭施用が森林に本来備わっている炭素隔離機能（NEP）に及ぼす中長期的影響
【関連する主な研究成果：研究成果2、3、5、14、28、29、41、42、48、50】

2015年にバイオ炭を施用したコナラ二次林において、生態学的手法を用いてNEPを測定した。まず、バイオ炭施用が森林のNPPに及ぼす影響を調べた。樹木の木部生産量は対照区で4.21-7.91 ton ha^{-1} $year^{-1}$、バイオ炭施用区で4.18-8.52（2017年）ton ha^{-1} $year^{-1}$であり、有意差は無かったもののほとんどの年で施用区の方が大きくなる傾向が認められた。

葉生産量はいずれの年においても処理区間に有意な差は認められず、年々変動も小さかったが、生殖器官の生産量はコナラ堅果（ドングリ）の生産量の差を反映して、年による変動が大きかった。また、バイオ炭施用直後から8年目まで、多くの年において生殖器官の生産量は施用区の方が有意に大きくなった。

バイオ炭施用後１年目と６年目の実験区のいずれにおいても樹木細根バイオマスの季節変動は小さく、処理区間で有意な差は認められなかった。スキャナ法を用いて算出した細根の回転率の値は先行研究の値と比べると非常に小さく、ばらつきも大きかった。この原因についてははっきりしないが、ばらつきの多い地下部データに対する反復数の少なさや、スキャン画像から人の目によって生きた細根をトレースするというところに技術的な限界があるかもしれない。後者については、土壌断面画像中の細根をAIで識別することを検討し、今後改善される可能性を示した【成果3】。しかし細根回転率については現時点では先行研究のFinér et al.（2011)で報告された温帯林の平均値（1.21 $year^{-1}$)用いることとし、ここに樹木細根バイオマスの平均値（2.83 ton ha^{-1}）を掛け合わせて細根生産量を3.4 ton ha^{-1} $year^{-1}$と算出した。また、年々変動は無いものと仮定してNEPの推定に用いた。

ササの地上部生産量については、処理区間で有意差は認められず、平均で0.71 ton ha^{-1} $year^{-1}$と推定された。ササの生産量についても年変動はないと仮定して、この値を各年のNEPの推定に用いた。以上の結果をまとめた合計NPPの平均値は対照区で17.41 ton ha^{-1} $year^{-1}$、バイオ炭施用区は18.86 ton ha^{-1} $year^{-1}$となった。2019年を除くすべての年でバイオ炭施用区の方が大きくなる傾向が認められたが、2023年以外は有意な差では無かった。

次にバイオ炭施用がHRに及ぼす影響を調べた結果、施用後2年目および3年後にはHRは対照区よりもバイオ

炭施用区で有意に大きかった【成果２】。HRが大きくなった理由として、リター分解の促進（Minamino et al., 2019)、バイオ炭中の易分解生の揮発性成分の分解（Wang et al., 2016）などが考えられた。一方、散布後4年目以降には処理区間でHRの有意差が認められなくなった。

ここまでのNPPの結果とHRの結果から、生態系の炭素収支（NEP）を算出した。バイオ炭施用後2年目と3年目の平均値でみると、対照区のNEPが4.3 ± 0.96（95%CI）Mg C ha^{-1} $year^{-1}$、バイオ炭施用区のNEPが3.3 ± 0.98（95%CI）Mg C ha^{-1} $year^{-1}$と推定された。すなわち、バイオ炭をコナラの二次林に施用することによって、短期的にはNEPが約23%も低下する事が明らかとなった。ただし、バイオ炭施用区では土壌に施用されたバイオ炭自身による7.10 Mg C ha^{-1}の炭素隔離がある。このため、施用後初期の3年間での全体の炭素隔離機能を考える場合には、無施用区の 12.9 Mg C ha^{-1}（4.3×3年）に対して、施用区は17.0 Mg C ha^{-1} (7.1 + 3.3×3年)となり、施用区での炭素隔離機能の方が32%大きくなる結果となった。

次にNEPへの影響を中長期的に見てみると、4年目以降は施用区でのHRの増加傾向が無くなるため、概してバイオ炭施用区の方でNEPが大きくなる傾向が認められた。施用後6年目から8年目の3年間の炭素収支について集計した結果、3年間のNEPは対照区で 1.8 ± 0.86（95%CI）Mg C ha^{-1}、施用区では 2.4 ± 1.19 (95%CI）Mg C ha^{-1}と推定され、バイオ炭施用直後の結果とは逆にNEPが33%上昇した。このように、初期3年ではバイオ炭施用はHRの増加を招いて生態系のNEPに対して負の影響を与えていたが、4年目以降はHRの増加は抑えられた。一方、バイオ炭施用区では、特に種子のなり年（2021年や2023年）において生殖器官の生産量が有意に増加し、全体として施用区でのNPPが増大する傾向が施用後8年目においても依然として継続していた。これらのことから、バイオ炭の森林生態系へのNEPへの負の影響は短期的なものであり、10年程度のスケールで考えた場合には、バイオ炭の土壌への炭素隔離だけでなく、森林のNEPの向上を含めて、生態系の炭素吸収能力に正の影響を与えることが明らかとなった。

（２）バイオ炭施用が窒素（N）動態に及ぼす影響【研究成果1、18、19、30、35、42、46、54】

林外雨および林内雨によるNフラックスを算出したところ、ほとんどの月で林内雨が林外雨を上回っていたが、樹冠の葉が展葉・成長する4-6月には純林内雨フラックスがマイナスになるケースが見られ、樹冠でのN吸収の存在が予想された。そこで林冠収支モデルを用いて植物体の葉面吸収を推定したところ、2024年2月～10月の葉面吸収フラックスは、NH_4-Nが7.62 kg N ha^{-1} $period^{-1}$、NO_3-Nが0.77 kg N ha^{-1} $period^{-1}$と推定された。これは純林内雨と同規模であり、葉面吸収を考慮しないと、大気から生態系への窒素沈着が過小評価されることが示唆された。この森林では、乾性沈着と湿性沈着と合わせると、年間31.5 kg N ha^{-1}が森林に供給されており、中でもNH_4-Nの沈着（19.4 kg N ha^{-1} $year^{-1}$）が多いという結果になった。

土壌中の無機態窒素量の測定結果では、バイオ炭施用後1年以内にはNO_3^-濃度が一時的に減少する一方で、施用後1年～2年の期間においてはNO_3^-濃度が一時的に増加する傾向が見られた。また、バイオ炭の散布は、施用直後には窒素無機化速度を抑制する一方で、その効果は中長期的には持続しない可能性が示唆された【成果１】。植物が利用可能な無機態窒素として土壌中に供給される量を見積もると、対照区では 173.6 kg N ha^{-1} $year^{-1}$、施用後1-2年目の施用区では 149.6 kg N ha^{-1} $year^{-1}$となって、一時的に無機化速度が低下することが確認された。一方、施用後7-8年目の施用区ではその値は167.8 kg N ha^{-1} $year^{-1}$であり、対照区と有意な差はなかった。以上の結果からこのような影響は施用直後の短期的なものであると考えられた。

生態系内の各窒素プールと窒素循環の結果をまとめた結果、植物のN要求量は、NPPの増加や葉中窒素濃度の増加などによりバイオ炭施用区の方が大きくなった。また葉中の窒素についてはリターとして葉を落とす前に、半分以上の窒素を回収していた。総N吸収量としては対照区では118.3 Kg N ha^{-1} $year^{-1}$であり、施用区では129.1 Kg N ha^{-1} $year^{-1}$となった。一方、植物に利用可能な土壌中の窒素供給量は149.6-173.6 Kg N ha^{-1} $year^{-1}$に達し、植物のN吸収量に対して十分な量と考えられた。前述のようにバイオ炭施用は土壌中の窒素無機化速度を減少させうるが、この地域では植物の総吸収量に対して十分な量のNが供給されること、そして外部からのN沈着量も多いことから、窒素が生産量の制限にはなっていないと考えられた。したがってバイオ炭施用によってNPPが増加した原因は、バイオ炭の灰分中の各種栄養塩の効果や、バイオ炭が土壌の保水力を長期的に高めるという土壌緩衝作用への効果（サブテーマ３参照）が影響している可能性が考えられた。

【サブテーマ３】

（１）土壌圏の諸特性（炭素賦存量、微生物群集、土壌浸透水、一般物理化学性）への影響

【関連する研究成果：研究成果4、17、18、19、30、31、34、35、43、47】

バイオ炭が施用された地表0～5cmにおける土壌炭素賦存量を調べたところ、施用されたバイオ炭に含まれる炭素量から推定される理論値（1.85 kg C m^{-2}）よりも小さい値（1.38 kg C m^{-2}）となった。一方、バイオ炭施用から９年が経過した2015年区のA層において炭素量が増加していたことから、バイオ炭の下方移動について精査する必要があると考えられた。そこで、鉱質土層0～15 cmにおける土壌炭素賦存量を調べたところ、バイオ炭施用後９年経過した時点で、0～12 cm深までの炭素量が無施用区のそれを上回っており、施

用したバイオ炭の約60%が下方に移動し、鉱質土層に賦存することを示唆する結果となった。今後、バイオ炭の挙動・動態をより直接的に明らかにするためにはブラックカーボンの定量（Dittmar, 2008）による動態情報が有効であると考えられた。

土壌微生物群集に対する影響評価では、バイオ炭施用後初期３年間において、処理区間で微生物バイオマス（PLFA量）や群集構造（PLFA組成）に有意な差は認められなかった。したがって、バイオ炭施用は研究期間を通じて微生物群集の量や質に大きな影響を及ぼさないと考えられた。

土壌水分プロファイルセンサーの計測結果では、VWCは深くなるにつれて高くなり、深層ほど水分量が多いことが示された。特に深さ5 cmおよび15 cmにおけるVWCは10%前後であり、土壌水分量がかなり低い状態であることが示された。2023年および2024における深度別の土壌浸透水フラックスは、全体として深度が深くなるほど小さくなる傾向が確認された。2022年区では、無施用区と比較して全ての深度において浸透水フラックスが一貫して低い傾向を示しており、バイオ炭を林地へ散布してから3年程度は、バイオ炭を含むリター層によって水分がトラップされ、鉱質土壌への浸透水量が抑制されることが示唆された。土壌水のpH、各種イオン濃度、有機炭素量については、対照区とバイオ炭施用区との間で概して有意差は認められなかったことから、バイオ炭施用がこれらに及ぼす影響は小さいと考えられた。

バイオ炭施用区ではリター層pHの上昇がみられたが、その後7年の経過で低下して無施用区とほぼ同じ値になった。また、そのpHの変化はpH5.0～5.7程度の範囲内であり、バイオ炭施用が土壌に負の影響をもたらす範囲ではなかった。全N量、有効態リン酸（トルオーグ法）、陽イオン交換能、交換性陽イオン量についても、バイオ炭施用による有意な影響は確認されなかった。

以上の結果をまとめると、バイオ炭の森林林床への施用では、森林土壌の物理的、生物的、化学的性質への中長期的なネガティブな効果は特に確認されなかった。

（２）土壌のレジリエンス機能（物理的・化学的緩衝能）への影響

【研究成果4、16、17、43】

バイオ炭施用区（2015年区、2022年区）では無施用区に比べて、鉱質土層表層0-5 cmにおけるVWCが常に高かったことから、本研究のように林床表層部に散布するだけであっても、バイオ炭による保水性向上の効果が見られた。一方、土壌温度についてはバイオ炭施用の有無による影響は認められなかった。

pH緩衝能については、詳細な予備検討を行った上で鉱質土壌とバイオ炭の添加モデル実験を実施した。その結果、鉱質土壌鉱質土壌においてはバイオ炭の添加が多いほどpH緩衝能が増強されること、その一方で、リターでは鉱質土壌ほどの増強効果は期待できないことが示唆された。野外試料の分析結果では、バイオ炭施用の有無によって、pH緩衝能に違いはほとんど見られなかった。

調査地に温暖化区と窒素添加区を設置したものの、使用した機器が精密な温度測定に不向きであった可能性が考えられた。実際の現場での昇温区内の体感気温、防風効果やバイオマス量から考慮すると、昇温効果は得られていたと考えられるが、バイオ炭施用区と無施用区の間で、地温や土壌水分の変化パターン、ササ地上部バイオマスなどに有意な差異は認められなかった。

以上の結果より、バイオ炭を林床に施用することで長期にわたって土壌の保水性が向上し、土壌の乾燥に対するレジリエンス機能が高まると考えられた。

【引用文献】

Dittmar, T. (2008) The molecular level determination of black carbon in marine dissolved organic matter. Organic Geochemistry, 39, 396-407.

Finér L, Ohasi M, Noguchi K, Hirano Y (2011) Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. Forest Ecology and Management 262, 2008-2023.

Kim, R.H., Son, Y., Lim, J.H., Lee, I.K., Seo, K.W., Koo, J.W., Noh, N.J., Ryu, S.R., Hong, S.K. & Ihm, B.S. (2006) Coarse woody debris mass and nutrients in forest ecosystem of Korea. Ecological Research 21: 819-827.

Minamino Y., Fujitake N., Suzuki T., Yoshitake S., Koizumi H., Tomotsune M. (2019) Effect of biochar addition on leaf-litter decomposition at soil surface during three years in a warm-temperate secondary deciduous forest, Japan. Scientific Reports 9, 16961.

Shi, R., Li, J., Jiang, J., Kamran, M. A., Xu, R., Qian, W., Qian, W. R. Y., & Qian, W. (2018). Incorporation of corn straw biochar inhibited the re-acidification of four acidic soils derived from different parent materials. Environmental Science and Pollution Research, 25, 9662-9672.

Wang J., Xiong Z., Kuzyakov Y. (2016) Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. GCB Bioenergy 8, 512-523.

Yan, E.R., Wang, X.H., Huang, J.J., Zeng, F.R., & Gong, L. (2007) Long-lasting legacy of forest succession and forest management: Characteristics of coarse woody debris in an evergreen broad-leaved forest of Eastern China. Forest Ecology and Management 252: 98-107

１．５．　研究成果及び自己評価

１．５．１．　研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

（１）バイオ炭施用が森林土壌に及ぼす中長期的影響を定量的に示した

農地へのバイオ炭施用ではすき込みが一般的であるのに対して、林地では土壌表層にそのまま散布投入するのが現実的であるが、そうしたケースにおけるバイオ炭の動態を調査した知見は無かった。本課題ではこのような森林特有の状況を踏まえて、バイオ炭と直接接触するリター層を分析することの重要性を示し、その分析に際しての諸問題を解決して定量的なデータを提示することができた。また、実際に森林にバイオ炭を施用して８年以上が経過した土壌を調べることにより、バイオ炭がリター層から鉱質土層の0～12 cm深にまで下方移動していることを明らかにした。人為的撹乱なしにバイオ炭が移行する現象を掴んだことは大きな発見であり、炭素隔離効果をコントロールする上で重要な要素を見出した。

中長期的に見ても、本研究課題におけるバイオ炭施用（10 ton ha^{-1}で１回だけ施用）は土壌の物理的、生物的、化学的性質に特に負の影響を及ぼさないこと、土壌圏に現れる影響の多くは施用後３年を待たずに消失することを明らかにした。このことは、林地へのバイオ炭施用にあたっての懸念を払拭するとともに、林地に数年単位でバイオ炭を繰り返し施用することも可能であることを示唆しており、炭素隔離方策、森林管理方策としてのバイオ炭の有効性を示すことができた。

（２）バイオ炭施用が生態系サービスを中長期的に強化することを定量的に示した

生態系へのバイオ炭施用は、土壌微生物群集を活性化させることで有機物分解を促進して土壌から大気中へと放出されるCO_2（HR）を増加させ、結果として生態系に本来備わっている炭素隔離機能（NEP）を減少させる懸念があったが、実際の森林におけるバイオ炭施用後のHRやNEPの変化についての知見は著しく不足していた。特に、例えば５年以上といった中長期的な視点で森林生態系に対するバイオ炭施用の影響を調べた研究例は全くなかった。本研究課題では、８年間に渡って生態学的手法を用いて生態系の炭素循環を解明し、HRの増大という懸念されていた負の効果が表れるのは初期３年間だけであり、その後４年目以降は生態系のNEPを平均で３割程度増加させることを示した（生態系が元来持つ炭素隔離機能を強化）。このことはバイオ炭の施用が、直接的な炭素隔離（バイオ炭自体の残存）を含めて一石二鳥の効果を持つことを意味している。

また、バイオ炭の施用は中長期的に土壌の保水性を向上させることが示された。このことは、森林生態系へのバイオ炭施用が、生態系機能の１つである土壌レジリエンス機能（特に物理的緩衝能）を強化することを意味している。一方で、中長期的に見てバイオ炭の施用は、先述した土壌圏を含めて森林生態系に対して特に負の影響を及ぼさなかった。以上のことから、里山林等の森林管理にバイオ炭を用いれば保水機能の増強が期待でき、その結果として、温暖化による乾燥化の影響による植生保護のみならず、近年頻繁に発生する山火事などの災害防止にも貢献できる可能性がある。

（３）CWDを原料として作出したバイオ炭を森林に戻す事業全体での包括的な炭素収支をLCAにより評価したことにより、バイオ炭を活用した森林管理の再開・強化と炭素隔離が両立することを示した

バイオ炭は一般に難分解性であるがゆえに長期間・安定的に土壌に残留し、炭素隔離につながることが期待されている。しかしこれまでは森林に放置され自然分解される運命にある粗大木質有機物をバイオ炭に変換することは具体的に検討されておらず、実際の林地においてバイオ炭の分解プロセスについての知見も不足していた。さらには、バイオ炭の作出・施用に伴う人為的なCO_2排出を考慮に入れた、包括的な炭素収支の検討も行われてこなかった。本研究課題ではこれらに応えるための研究に取り組み、森林に存在するCWDがバイオ炭の潜在的材料として有望であること、森林においても施用されたバイオ炭の分解速度が極めて遅いこと、CWDをバイオ炭にして林地に戻す事業全体でも炭素隔離効果が見込めること、などを定量的に示すことができた。

＜環境政策等へ既に貢献した研究成果＞

森林へのバイオ炭施用による炭素隔離に関して、2022年度に科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）よりヒアリングを受けた（研究代表者）。その内容は翌年2023年度の「CRDS戦略プロポーザル：CRDS戦略プロポーザル：バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究」

（CRDS-FY2022-SP-08、JST-CRDS）において、日本の陸域での取り組み事例として掲載された。
また、2022年度に開催された環境省の「CO_2吸収源拡大のためのバイオ炭施用拡大に向けた検討会」に研究代表者が専門委員として参加し、本研究課題のサブテーマ２および３で実施中であった落葉広葉樹二次林でのバイオ炭施用実験について一部定量的データを交えて紹介し、林地でのバイオ炭施用拡大に向けた議論促進に貢献した。また、令和６年度に開催された同検討会にも参加し、本研究課題の成果を紹介した。特に本研究課題サブテーマ１で得られたライフサイクルアセスメントの結果に基づき、今後IPCC方法論報告書などへの貢献の可能性を含め、林地へのバイオ炭施用の有効性・将来性について議論した。

＜環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果＞
農地でバイオ炭施用が進んだ背景には、IPCC報告書における方法および算定式が策定されたこと、そして国内でJ-クレジットとして認証されたことがある。現時点のIPCC方法論報告書において森林がバイオ炭施用の対象に含まれていないのは、森林へのバイオ炭施用の効果や生態系への影響に関する科学的知見が著しく不足しているからに他ならないが、本研究課題で得られた成果は、そのギャップを埋める大きな第一歩となることが見込まれる。
また、森林へのバイオ炭施用がもたらす直接的・間接的炭素隔離（大気CO_2削減効果）は、2021 年に定められた地域脱炭素ロードマップにおける「地域の自然資源等を生かした吸収源対策」や「食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立」に貢献する。またその過程では、有機物残渣の利活用のための里山管理の再開・促進と、バイオ炭施用に伴うレジリエンスの向上で里山の機能・価値向上に資する可能性があるため、本研究課題で得られる科学的根拠をもとにして「SATOYAMA イニシアティブ」などの里山再生事業とも連携・協働できる。
本研究では林床にバイオ炭を施用するだけで、目立った負の側面が無いままに長期的・安定的な炭素隔離が可能なこと、いくつかの生態系機能（本来森林に備わっている炭素隔離能や、土壌レジリエンス機能）を強化できることが示された。このことは、バイオ炭の活用によって、比較的安価に我が国の森林が抱えている諸問題を緩和できる可能性があることを意味しており、将来的には林業政策、山林の防災事業、地域活性化事業などに貢献することが見込まれる。

１．５．２．　研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

＜全体達成状況の自己評価＞・・・・・　　２．目標を上回る成果をあげた

「林地へのバイオ炭施用によるCO_2放出の削減と生態系サービスの強化に関する研究」（早稲田大学、吉竹晋平）

全体目標	全体達成状況
林地で発生する様々な有機物残渣を原料としたバイオ炭を作出し、自然分解と比較した際のCO_2放出の削減効果を算出する。また、バイオ炭を施用したときの生態系の短期的応答について、バイオ炭の種類や土壌の違いが与える影響を評価する。さらに、実際の林地へのバイオ炭の施用が、生態系の各構成要素および生態系サービス（炭素隔離機能やレジリエンス機能）に及ぼす中長期的影響を定量的に評価する。	１．目標に掲げた通り、複数の森林タイプを対象として、未利用の有機物残渣である粗大木質有機物を原料としてバイオ炭の作出を実施し、そのまま林床に放置して自然分解するケースに比べ、それをバイオ炭に変換した際にどれだけ大気へのCO_2放出量を削減できるかを示すことができた（研究成果33、82）。 （主にサブテーマ１が担当） ２．目標を超えた部分として、原料の収集から運搬、炭化、森林への施用、施用後の生態系応答などを全て含めたライフサイクルアセスメントを実施し、事業全体でカーボンネガティブとなることを示すことができた（研究成果45、81）。 （主にサブテーマ１が担当したが、サブテーマ２とも連携し、バイオ炭施用後の生態系炭素隔離機能の中長期的な応答に関するデータを解析に導入した） ３．目標に掲げた通り、複数の異なる森林タイプを模したポット栽培実験を実施し、バイオ炭

	が生態系に与える影響の違いについて定量的に評価を行うことができた（研究成果49、53）。 （主にサブテーマ１が担当） ４．目標に掲げた通り、実際にバイオ炭が施用された森林において、生態系の各構成要素や生態系サービス（炭素隔離機能やレジリエンス機能）に及ぼす中長期的（～８年）を定量的に評価することができた（研究成果1～3）。 （主にサブテーマ２とサブテーマ３が連携して担当）

＜サブテーマ１達成状況の自己評価＞・・・・・・・　２．目標を上回る成果をあげた

「落葉落枝等からのバイオ炭の作出とポット栽培を用いた短期的な生態系応答の解明」（早稲田大学、吉竹晋平）

サブテーマ１目標	サブテーマ１達成状況
複数の森林サイトで得られる剪定枝などを原料としてバイオ炭を試験的に作出し、収率や野外での分解率等のデータをもとに、これら有機物残渣が林床で自然分解した場合に比べてどの程度CO_2放出削減効果があるかを評価する。 また、得られたバイオ炭と現地の土壌を用いたポット栽培実験により、それぞれのバイオ炭が生態系の各要素に与える短期的な影響を定量的に評価する。	１．森林に存在する倒木などの未利用の粗大木質有機物の存在量、それを原料にバイオ炭を作出する際の収炭率・炭化率、それを林床に施用した際の分解速度などの定量的データを予定通り取得し、バイオ炭にすることでCO_2放出をどの程度削減できるのかが評価できた（研究成果13、27、33、82、56）。 ２．複数の森林タイプを模したポット実験を実施し、バイオ炭が森林生態系に及ぼす短期的影響について定量的に評価できた（研究成果9、20、26、49、52、53）。 ３．目標を超えた部分として、当初目標に含まれていなかったが試験的なライフサイクルアセスメントを実施した。上記１のデータとサブテーマ２で得られたバイオ炭施用後の生態系の炭素隔離機能（純生態系生産NEP）の変化、さらに既存の文献値を統合したアセスメントにより、森林の未利用有機物をバイオ炭にして元の森林に戻す事業の包括的な炭素収支を明らかにし、本事業が正味の炭素隔離（カーボンネガティブ）となることを示すことができた（研究成果25、41、45、81）。 ４．以上より、目標を上回る成果を上げたと判断した。

＜サブテーマ２達成状況の自己評価＞・・・・・・・　３．目標どおりの成果をあげた

「バイオ炭施用に伴う中長期的な生態系の応答性と炭素隔離機能の定量的評価」（岐阜大学、大塚俊之）

サブテーマ２目標	サブテーマ２達成状況
2015年にバイオ炭施用を行った落葉広葉樹二次林では、短期的にはリター分解と樹木種子生産の両方の増加が認められた。これらは炭素隔離機能（Net ecosystem production; NEP）に対して正反対の効果をもたらす。しかし、細根生産を含めたNEPの定量的評価と、中長期的な応答性についてはまだ解答が得られていない。本サブテーマでは、バイオ炭施用が土壌中の栄養塩動態に与える変化を通して、森	１．バイオ炭施用から8年間にわたるNEPの変化を、細根生産を含めて定量的に評価できた（研究成果2, 3, 5, 14, 28, 29, 41, 42, 48, 50）。 ２．系外からの窒素沈着と植物が利用可能な窒素の土壌中への供給量の時間的な変化を測定し、バイオ炭施用が土壌中の栄養塩動態に与

林生態系のNEPに与える中長期的な効果を野外で定量的に評価する。	える変化を定量化できた。また、バイオ炭施用に伴う植物の窒素要求量の変化を定量することで、バイオ炭施用に伴う窒素循環の変化がNEPに与える中長期的な効果を野外で評価できた（研究成果1、18、19、30、35、42、46、54）。

＜サブテーマ３達成状況の自己評価＞・・・・・・・　３．目標どおりの成果をあげた

「バイオ炭施用に伴う中長期的な土壌圏の応答性とレジリエンス機能の定量的評価」（神戸大学、藤嶽暢英）

サブテーマ３目標	サブテーマ３達成状況
2015年にバイオ炭施用を行った森林研究サイトを用いて、施用に伴う中長期的な土壌圏の応答性（炭素賦存量、水分などの物理性、栄養塩などの化学性などにおける変化）を定量的に解明する。また、急激な環境変動ストレスに対する土壌のレジリエンス機能（物理的・化学的緩衝作用）について、バイオ炭施用による増強効果を定量的に評価し、作用機構の解明を試みる。	１．目標に掲げていた、バイオ炭施用後の土壌圏の応答性（炭素賦存量、水分などの物理性、栄養塩などの化学性などにおける変化）を分析し、定量評価を行うことができた（研究成果4、17、18、19、30、31、34、35、43、47）。 ２．土壌のレジリエンス機能（物理的・化学的緩衝作用）として、バイオ炭施用が保水性、温度保持、pH緩衝、栄養塩保持にもたらした効果を定量的に評価できた。また、それらの作用機構の解明を試みた。（研究成果4、16、17、43）

１．６．　研究成果発表状況の概要

１．６．１．　研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	3
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	16
口頭発表・ポスター発表	53
マスコミ等への公表・報道等	8
成果による受賞	2
その他の成果発表	0

１．６．２．　主要な研究成果発表

成果 番号	主要な研究成果発表 （「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋）
1	Yasuki, N. Saso, W., Koizumi, H., Iimura, Y., Ohtsuka T., & Yoshitake S. (2024) Decreease in inorganic nitrogen and net nitrogen transformation rates with biochar application in a warm-temperate broadleaved forest. *Forests* 15: 572. (DOI: 10.3390/f15030572)
2	Yoshitake, S., Enichi, K., Tsukimori, Y., Ohtsuka, T., Koizumi, H., & Tomotsune, M. (2025) Long-term effects of biochar application on soil heterotrophic respiration in a warm-temperate oak forest: *Forests* 16: 489. (DOI: 10.3390/f16030489)
3	Yanase, H., Machida-Sano, I., & Yoshitake, S. (2025) Analysis of fine root dynamics in forest ecosystems using artificial intelligence-based image segmentation. *Ecological Research* 40: e12560. (DOI: 10.1111/1440-1703.12560)

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

１．６．３．　主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は、「国民との科学・技術対話」16件、「マスコミ等への公表・報道等」8件、合計で24件行った。また、本年度には調査地であるコナラ二次林が位置している埼玉県本庄市の市民大学講座において依頼を受けて本研究課題の成果について講演を行う見通しである。大学生はもちろんのこと、中学生・高校生、あるいは一般市民を対象として、我々の研究成果を広く発信することに努めてきた。今後社会に出て活躍する若い世代、あるいは気候変動や炭素隔離方策に関心のある現役世代に対して本研究の成果発信を行うことで、バイオ炭を用いたアプローチの有効性への理解が深まり、市民レベルでの活動（NPOや地域住民コミュニティ）につながるという効果を期待している。

１．７．　国際共同研究等の状況

＜国際共同研究の概要＞

国際共同研究を実施していない。

＜相手機関・国・地域名＞

機関名（正式名称）	（本部所在地等の）国・地域名
国際共同研究を実施していない。	

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

１．８．　研究者略歴

＜研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴＞

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
吉竹晋平	研究代表者及びサブテーマ１リーダー 広島大学生物圏科学研究科博士後期課程修了 博士（学術） 岐阜大学助手を経て、 現在、早稲田大学准教授 専門は生態系生態学および土壌微生物生態学
大塚俊之	サブテーマ２リーダー 千葉大学大学院自然科学研究科環境科学専攻 博士課程修了 博士（理学） 茨城大学理学部理学科 准教授を経て、 現在、岐阜大学環境社会共生体研究センター 教授 日本生態学会専務理事 第４回（2011）日本生態学会大島賞受賞 専門は生態系生態学
藤嶽暢英	サブテーマ３リーダー 神戸大学自然科学研究科博士後期課程修了 学術博士 神戸大学助手、同助教授（准教授）を経て、 現在、神戸大学教授 環境省「生活環境等の保全に係る土壌管理に関する検討会」委員 日本土壌肥料学会奨励賞、同学会賞を受賞 専門は土壌学（化学）、研究テーマは土壌有機物分析

２．　研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

（１）　研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	3
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	16
口頭発表・ポスター発表	53
マスコミ等への公表・報道等	8
成果による受賞	2
その他の成果発表	0

（２）　産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない				

（３）　論文

＜論文＞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2024	Yasuki, N. Saso, W., Koizumi, H., Iimura, Y., Ohtsuka T., & Yoshitake S. (2024) Decrease in inorganic nitrogen and net nitrogen transformation rates with biochar application in a warm-temperate broadleaved forest. Forests 15: 572. (DOI: 10.3390/f15030572)	2	有
2	2025	Yoshitake, S., Enichi, K., Tsukimori, Y., Ohtsuka, T., Koizumi, H., & Tomotsune, M. (2025) Long-term effects of biochar application on soil heterotrophic respiration in a warm-temperate oak forest: Forests 16: 489. (DOI:	2	有

		10.3390/f16030489)		
3	2025	Yanase, H., Machida-Sano, I., & Yoshitake, S. (2025) Analysis of fine root dynamics in forest ecosystems using artificial intelligence-based image segmentation. Ecological Research 40: e12560. (DOI: 10.1111/1440-1703.12560)	2	有

（4） 著書

＜著書＞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
	特に記載する 事項はない		

（5） 口頭発表・ポスター発表

＜口頭発表・ポスター発表＞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ	査読 の有無
4	2022	藤嶽暢英（2022）バイオ炭でパリ協定に貢献できるか？関西土壌肥料協議会第101回シンポジウム（神戸）2022年12月	3	無
5	2022	吉竹晋平（2022）森林生態系へのバイオ炭の施用～野外散布実験と生態系・土壌圏の応答に関する長期モニタリング～．関西土壌肥料協議会第101回シンポジウム（神戸）2022年12月	2	無
6	2023	岡田駿、吉竹晋平（2023）バイオチャー散布が暖温帯コナラ林における7年間の炭素動態に及ぼす影響．第2回生態系生態学連合研究発表会（東京）2023年2月	2	無
7	2023	樽見知樹、吉竹晋平（2023）異なる3種類の森林タイプにおける粗大木質有機物を用いたバイオ炭の試験的作出とその性状評価．第2回生態系生態学連合研究発表会（東京）2023年2月	1	無
8	2023	緑川皆、吉竹晋平（2023）森林生態系へのバイオチャー散布が樹木細根動態及び菌根形成に及ぼす影響の解明．第2回生態系生態学連合研究発表会（東京）2023年2月	2	無
9	2023	進藤恵太、友常満利（2023）樹木実生に対するバイオチャー散布の影響評価のための圃場実験系の確立．第2回生態系生態学連合研究発表会（東京）2023年2月	1	無
10	2023	依田真由、友常満利（2023）玉川学園内におけるバイオチャー作出のための有機物資材量の推定と炭化率の測定．第2回生態系生態学連合研究発表会（東京）2023年2月	1	無
11	2023	友常満利、依田真由、進藤恵太、関川清広（2023）里山生態系における有機物残渣の炭化（バイオチャー）による炭素隔離の試み．第70回日本生態学会大会（仙台）2023年3月	1	無
12	2023	岡田駿、月森勇気、惠日格也、友常満利、小泉博、吉竹晋平（2023）バイオチャー散布が暖温帯コナラ林における7年間の土壌炭素フラックスに及ぼす影	2	無

		響. 第70回日本生態学会大会（仙台）2023年3月		
13	2023	Tomotsune, M., Sugisaki, Y., Katsushima, K., Tarumi T., Yoshitake, S., Sekikawa, S. (2023) An attempt at carbon sequestration through biochar amendment on a satoyama landscape in Japan. The 10th EAFES International Congress (Jeju, Korea) 2023年7月	1	無
14	2023	岡田駿、月森勇気、惠日格也、友常満利、小泉博、飯村康夫、大塚俊之、近藤美由紀、藤嶽暢英、吉竹晋平（2023）森林へのバイオ炭施用が7年間の従属栄養生物呼吸に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	2	無
15	2023	吉竹晋平、佐宗若奈、安木奈津美、飯村康夫、大塚俊之、近藤美由紀、友常満利、藤嶽惕英、橋本麗優、小泉博（2023）、森林へのバイオ炭施用が土壌微生物群集に及ぼす短期的影響. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	3	無
16	2023	仙波成都、飯村康夫、吉竹晋平、藤嶽暢英（2023）森林土壌におけるバイオ炭の添加がpH緩衝能に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	3	無
17	2023	藤崎綾音、飯村康夫、大塚俊之、近藤美由紀、吉竹晋平、藤嶽暢英（2023）森林へのバイオ炭施用にともなう土壌水分の中長期的な応答性. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	3	無
18	2023	近藤美由紀、久司雅登、篠原隆一郎、中島知里、飯村康夫、藤嶽暢英、吉竹晋平、大塚俊之（2023）バイオ炭施用した暖温帯コナラ林における林内雨による窒素沈着と土壌への浸透. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	2	無
19	2023	飯村康夫、前田大和、大塚俊之、近藤美由紀、藤嶽惕英、吉竹晋平（2023）森林でのバイオ炭散布が表層土壌の栄養塩動態に及ぼす中長期的影響. 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会（松山）2023年9月	3	無
20	2024	熊前莉夏、吉竹晋平（2024）バイオチャー散布が土壌呼吸に及ぼす影響～3つの森林を模したポット栽培での検証～. 第3回生態系生態学連合研究発表会（東京）2024年2月	1	無
21	2024	三森大暉、吉竹晋平（2024）炭素隔離を目指して森林に散布されたバイオチャーのゆくえ～無機化と溶出に注目して～. 第3回生態系生態学連合研究発表会（東京）2024年2月	1	無
22	2024	簗瀬久志、吉竹晋平（2024）画像識別AIを用いた森林における細根動態の試験的解析. 第3回生態系生態学連合研究発表会（東京）2024年2月	2	無
23	2024	広沢直也、友常満利（2024）バイオ炭がリター分解に与える影響とその林分間比較. 第3回生態系生態学連合研究発表会（東京）2024年2月	2	無
24	2024	三崎恵芽生、友常満利（2024）森林生態系におけるバイオチャー散布が土壌動物に与える影響. 第3回生態系生態学連合研究発表会（東京）2024年2月	3	無
25	2024	樽見知樹、友常満利、進藤恵太、依田真由、吉竹晋平（2024）LCAを用いた森林でのバイオチャーによる炭素隔離の評価～作出から生態系応答まで～. 第	1	無

		71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月		
26	2024	熊前莉夏、樽見知樹、簗瀬久志、橋本麗優、伊木未知夏、三森大暉、友常満利、吉竹晋平（2024）バイオチャー散布が土壌呼吸に及ぼす影響～3つの森林を模したポット栽培での検証～. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	1	無
27	2024	三森大暉、樽見知樹、友常満利、吉竹晋平（2024）炭素隔離を目指して森林に散布されたバイオチャーのゆくえ～無機化と溶出に注目して～. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	1	無
28	2024	簗瀬久志、吉竹晋平（2024）スキャナ法と画像識別AIを用いた森林における細根動態の試験的解析. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	2	無
29	2024	広沢直也、小嶋宥樹、杉崎義和、吉竹晋平、友常満利（2024）優占種の異なる4林分におけるバイオチャー散布が初期リター分解に与える影響. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	2	無
30	2024	近藤美由紀、久司雅登、篠原隆一郎、中島知里、飯村康夫、藤嶽暢英、吉竹晋平、篠塚賢一、大塚俊之（2024）関東地方の暖温帯コナラ林における溶存有機窒素と溶存無機窒素による窒素沈着. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	2	無
31	2024	内田理沙、藤崎綾音、鈴木武志、飯村康夫、大塚俊之、近藤美由紀、吉竹晋平、藤嶽暢英（2024）暖温帯コナラ林におけるバイオチャー散布に伴う土壌の一般理化学生の経年変化. 第71回日本生態学会大会（横浜）2024年3月	3	無
32	2024	友常満利、杉崎義和、和田日向子、小原廣幸、山﨑旬、関川清広（2024）バイオ炭を用いた環境教育；都市緑地としての玉川学園キャンパスでの実践事例. 第22回日本炭化学会（仙台）2024年9月	1	無
33	2024	三森大暉、樽見知樹、橋本麗優、友常満利、吉竹晋平（2024）森林土壌に施用されたバイオチャーの炭素・窒素吸着と炭素隔離効果. 日本土壌肥料学会2024年度福岡大会（福岡）2024年9月	1	無
34	2024	内田理沙、藤崎綾音、大下田真帆、飯村康夫、大塚俊之、近藤美由紀、吉竹晋平、鈴木武志、木田森丸、藤嶽暢英（2024）林地に施用されたバイオ炭の動態解析. 日本土壌肥料学会2024年度福岡大会（福岡）2024年9月	3	無
35	2024	中島知里、大塚俊之、吉竹晋平、飯村康夫（2024）暖温帯落葉広葉樹林でのバイオ炭施用が土壌中の栄養塩動態に及ぼす中長期的影響. 日本土壌肥料学会2024年度福岡大会（福岡）2024年9月	3	無
36	2025	岡田駿、吉竹晋平（2025）森林土壌へのバイオチャー散布が従属栄養生物呼吸に影響を及ぼすメカニズムの解明. 第４回生態系生態学連合研究発表会（東京）2025年2月	2	無
37	2025	樽見知樹、吉竹晋平（2025）ライフサイクルアセスメントを用いたバイオチャーによる包括的な炭素隔離効果の定量. 第４回生態系生態学連合研究発表会（東京）2025年2月	1	無
38	2025	橋本麗優、吉竹晋平（2025）バイオチャー散布が窒素吸着を介して森林生態系の窒素循環に及ぼす影	2	無

		響.第４回生態系生態学連合研究発表会(東京)2025年2月		
39	2025	冨澤佳生、吉竹晋平（2025）バイオチャーに定着する微生物のバイオマス測定法の検討と実測.第４回生態系生態学連合研究発表会（東京）2025年2月	1	無
40	2025	和田日向子、友常満利（2025）森林へのバイオチャー散布がリター分解に及ぼす影響 ― 優占種の異なる5林分での比較. 第４回生態系生態学連合研究発表会（東京）2025年2月	2	無
41	2025	吉竹晋平、友常満利（2025）落葉広葉樹二次林を対象としたバイオチャー施用実験.第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無
42	2025	大塚俊之、近藤美由紀（2025）バイオチャーが森林の炭素循環に与える影響.第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	2	無
43	2025	藤嶽暢英、飯村康夫（2025）バイオチャーが森林土壌に与える影響. 第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	3	無
44	2025	友常満利、関川清広（2025）玉川学園におけるバイオチャーを用いた環境教育.第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無
45	2025	樽見知樹、友常満利、吉竹晋平（2025）森林へのバイオチャー施用は炭素隔離方策として有効か？～LCAによる包括的評価～. 第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無
46	2025	近藤美由紀、篠塚賢一、吉竹晋平、大塚俊之（2025）樹冠収支モデルによる暖温帯コナラ林の乾性沈着と樹冠交換の推定.第72回日本生態学会大会(札幌)2025年3月	2	無
47	2025	内田理沙、近藤美由紀、飯村康夫、大塚俊之、吉竹晋平、鈴木武志、木田森丸、藤嶽暢英（2025）暖温帯コナラ林下の土壌に施用されたバイオ炭の鉛直分布. 第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	3	無
48	2025	和田日向子、広沢直也、杉崎義和、渡邉颯洸、吉竹晋平、友常満利（2025）バイオチャー散布がリター分解に与える影響～優占種が異なる5林分間での比較～. 第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	2	無
49	2025	熊前莉夏、渡邉颯洸、樽見知樹、岡田駿、三森大暉、友常満利、吉竹晋平（2025）現地材バイオチャーは森林土壌からのCO_2フラックスを増加させない. 第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無
50	2025	岡田駿、橋本麗優、熊前莉夏、吉竹晋平（2025）森林土壌へのバイオチャー散布が土壌微生物呼吸に影響を及ぼすメカニズム.第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	2	無
51	2025	冨澤佳生、山本真瑠、町田郁子、三森大暉、樽見知樹、吉竹晋平（2025）森林土壌に散布されたバイオチャーにおける微生物バイオマスの測定.第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無
52	2025	関川清広、熊前莉夏、吉竹晋平、友常満利（2025）バイオチャー散布はポット生態系の炭素フラックスに影響するか？ 第72回日本生態学会大会(札幌)2025年3月	1	無
53	2025	渡邉颯洸、熊前莉夏、和田日向子、関優斗、関川清広、吉竹晋平、友常満利（2025）ポット実験におけ	1	無

		るバイオチャー散布がコナラ・スギ・アカマツ稚樹の生長に与える影響．第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月		
54	2025	橋本麗優、岡田駿、三森大暉、友常満利、吉竹晋平（2025）森林土壌に散布したバイオチャーの窒素吸着・放出が土壌中窒素動態に及ぼす影響．第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	2	無
55	2025	簗瀬久志、竹内宏太、野村みおと、緑川皆、吉竹晋平（2025）森林へのバイオチャー施用は細根動態にどう影響するか？～画像認識AIによる解析～．第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	2	無
56	2025	松尾旺、樽見知樹、依田真由、友常満利（2025）玉川学園における様々な有機物質材を用いたバイオチャーの作出と収炭・炭化率の比較．第72回日本生態学会大会（札幌）2025年3月	1	無

（６）　「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
57	2022	友常満利（2022）東京農業大学第三高等学校附属中学校での特別講義「農業と環境」（埼玉）2022年4月26日	2
58	2022	吉竹晋平（2022）日本木炭新用途協議会講演会での講演「林地への木質バイオ炭の施用実験と生態系応答・炭素循環の長期モニタリング」（東京）2022年7月13日	2
59	2022	友常満利（2022）玉川大学オープンキャンパスでの特別講義「炭を使って地球温暖化を防止！？ 」（東京）2022年9月10日	1
60	2022	友常満利（2022）玉川学園高等部での特別講義「生態系の構造と機能」（東京）2022年10月14日	2
61	2022	藤嶽暢英(2022)関西土壌肥料協議会第101回シンポジウムの開催(神戸）2022年12月2日	3
62	2023	友常満利（2023）第42回横浜開港祭での展示「Tamagawa Mokurin Project：バイオチャーによる生態系への炭素隔離技術の創出」（横浜）2023年6月2-3日	1
63	2023	友常満利（2023）千葉県立船橋東高等学校での特別講義「自然を知り、活かす；炭素循環から考える生態系の構造と機能」（千葉）2023年6月6日	1
64	2023	友常満利（2023）玉川学園中学部での特別講義「SDGｓのための里山管理とバイオチャー（炭）の利活用」（東京）2023年7月27日	1
65	2023	友常満利（2023）玉川学園高等部での特別講義「自然を知り活用する：生態系の構造と機能」2023年10月20日	2
66	2023	友常満利（2023）玉川学園小学・中学部での特別講義「都市の残された貴重な緑地：玉川学園の自然」（東京）2023年11月1日	2
67	2023	友常満利（2023）橘学苑高等学校での特別講義「自然を知り、活かす；炭素循環から考える生態系の構造と機能」（横浜）2023年11月14日	2
68	2024	友常満利（2024）東京都立上野高校での出張講義「炭を使ってマイナスカーボンな社会を目指す！？；炭素循環に基づく生態系の理解と活用」（東京）2024年7月9日	1
69	2024	吉竹晋平（2024）日本バイオ炭コンソーシアム公園緑地研究部会での招待講演「落葉広葉樹二次林へのバイオ炭施用と生態系応答」（東京）2024年8月27日	2
70	2024	友常満利（2024）日本バイオ炭コンソーシアム公園緑地研究部会での招待講演「玉川学園におけるバイオ炭を活用した環境教育；都市緑地の管理と炭素隔離」2024年8月27日	1

71	2024	友常満利（2024）玉川学園高等部での出張講義「生態系の構造と機能」（東京）2024年10月28日	2
72	2024	友常満利（2024）東京都立日野高校での出張講義「炭を使ってマイナスカーボンな社会を目指す！？；炭素循環に基づく生態系の理解と活用」（東京）2024年11月19日	1

（7） マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
73	2022	友常満利，雑誌記事「分野を超えた学びを実現するために」，全人871号，4-9頁，2022年5月10日	1
74	2022	友常満利，雑誌記事「SDGsの取り組み」，全人特別号，10頁，2022年7月1日	1
75	2022	友常満利，新聞記事「「マイナスカーボン」へ実践」，読売新聞，2022年7月10日，11頁	1
76	2022	友常満利，新聞記事「キャンパス万華鏡:炭を使った里山への炭素隔離の実証実験を通して環境保全に貢献できる人材を育成」，教育学術新聞，2022年10月12日，6頁	1
77	2022	友常満利，雑誌記事「マイナスカーボンを”炭”でめざす」，全人868号11頁，2022年11月10日	1
78	2023	友常満利，雑誌記事「マイナスカーボンを炭で目指す」，全人特別号，11頁，2023年7月10日	1
79	2024	友常満利，新聞記事「炭でマイナスカーボン化」，日刊工業新聞（全国版），1頁，2024年5月9日	1
80	2024	友常満利，雑誌記事「世界のトップや技術の最先端を体感する」，全人特別号， 10-11頁，2024年7月10日	1

（8） 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
81	2024	日本生態学会ポスター優秀賞，日本生態学会，2024年3月16日 樽見知樹、友常満利、進藤恵太、依田真由、吉竹晋平（2024）LCAを用いた森林でのバイオチャーによる炭素隔離の評価～作出から生態系応答まで～.	1
82	2024	日本土壌肥料学会若手ポスター発表優秀賞，日本土壌肥料学会，2024年9月4日 三森大暉、樽見知樹、橋本麗優、友常満利、吉竹晋平（2024）森林土壌に施用されたバイオチャーの炭素・窒素吸着と炭素隔離効果.	1

（9） その他の成果発表

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
	特に記載する事項はない		

権利表示・義務記載

本報告書に表示・記載された企業名・製品名等は、各社の商標又は登録商標である。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract

[Project Information]

Project Title :	Reduction of CO_2 Emission and Boost of Ecosystem Services by Applying Biochar to Forest Ecosystems
Project Number :	JPMEERF20221C07
Project Period (FY) :	2022-2024
Principal Investigator :	Yoshitake Shinpei
(PI ORCID) :	ORCID：0000-0003-2245-6677
Principal Institution :	Waseda University
Cooperated by :	Gifu University, Kobe University, National Institute for Environmental Studies, The University of Shiga Prefecture, Tamagawa University
Keywords :	Biochar, Forest ecosystem, Carbon cycle, Carbon sequestration, Soil

[Abstract]

Biochar, which is obtained by pyrolysis under oxygen-limiting conditions and applied to soil, is one of the low-cost options for carbon sequestration for climate change mitigation. We hypothesize that by converting unused organic matter accumulated in forests (coarse woody debris (CWD) such as dead and fallen trees and prunings) into biochar and returning it to forest floors, long-term and stable carbon sequestration by biochar could be achieved while promoting forest management and solving the problem of underuse. The objective of this study was to obtain the scientific knowledge necessary to verify the effectiveness and feasibility of such a project; that is, quantitative data on CO_2 emission reductions when biochar is used and on changes in forest ecosystem services after biochar application.

The effects of biochar on ecosystem components and ecosystem services, such as carbon sequestration (Net Ecosystem Production; NEP) and soil resilience (physical and chemical buffering capacity), were investigated in a secondary deciduous broad-leaved forest where biochar was applied at 10 ton ha^{-1} in 2015. Biochar application increased CO_2 emissions from decomposition in the short term (~3 years) but increased plant primary production over 8 years, resulting in an increase in NEP. Biochar spread on the soil surface migrated downward and remain in the mineral soil layer after 7–10 years. Furthermore, from a long-term perspective, biochar had no negative effects on the physical, biological, or chemical properties of the soil, and maintained a high moisture content in the shallow soil layer.

Quantitative data were obtained on the amount of coarse woody debris (CWD) on the forest floor, the carbonization rate of converting it to biochar, and the decomposition rate of biochar on the forest floor. A preliminary life cycle assessment of the entire project, encompassing the entire process from collection of CWD, transportation, carbonization, biochar application, and changes in

NEP, showed that this project is carbon negative as a whole.

A pot-culture experiment simulating several forest types to determine the short-term effects of biochar application indicated that biochar application tended to promote the growth of saplings of all tree species without adversely affecting the components of the ecosystem.

These results indicate that projects that convert unused forest organic matter into biochar and return it to the forest floor are carbon negative as a whole, and that biochar application to forests has little negative impact on ecosystem components in the long term, enhancing carbon sequestration and soil resilience.

[References]

Yasuki, N., Saso, W., Koizumi, H., Iimura, Y., Ohtsuka T., & Yoshitake S. (2024) Decreease in inorganic nitrogen and net nitrogen transformation rates with biochar application in a warm-temperate broadleaved forest. *Forests* **15**: 572. DOI: 10.3390/f15030572

Yoshitake, S., Enichi, K., Tsukimori, Y., Ohtsuka, T., Koizumi, H., & Tomotsune, M. (2025) Long-term effects of biochar application on soil heterotrophic respiration in a warm–temperate oak forest. *Forests* **16**: 489. DOI: 10.3390/f16030489

Yanase, H., Machida-Sano, I., & Yoshitake, S. (2025) Analysis of fine root dynamics in forest ecosystems using artificial intelligence-based image segmentation. *Ecological Research* **40**: e12560. DOI: 10.1111/1440-1703.12560

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20221C07) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.