

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12605

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0185

研究課題名（和文）半乾燥熱帯アフリカ畑作地における持続可能な集約化のための混作技術革新

研究課題名（英文）Innovation of intercropping for Sustainable Intensification in dry tropical cropland of Sub-Sahara Africa

研究代表者

杉原 創（Sugihara, Soh）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30594238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土壌リン欠乏を改善し持続的に増産するために、当地で伝統的に行われてきたマメ科と主作物との混作技術革新に必要な知見を獲得することを目的に、国際共同研究を実施した。成果として、マメ科と主作物の根圏共有は土壌作物間のリン循環を改善し施肥リンの利用効率を改善すること、リン施肥条件下であれば根粒菌接種はマメ科の難溶性リン可給化能を改善すること、根圏共有型混作への根粒菌の接種効果は顕著でないこと、が得られた。以上から、当地におけるリン循環の改善に根圏共有型混作が有効であること、一方で更なる改善には、混作根圏の微生物群集の理解が重要である（単一の菌接種は困難）ことが判った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、非根圏型共有混作と比べて根圏共有型混作では、施肥リンの根圏への集積とそれに伴う作物リン吸収量の増加が明確に観測された。このことは半乾燥熱帯アフリカにおいて、貴重なリン資源の効率的利用に根圏共有型混作が有効であることを示しており、今後の技術開発に貢献するという意味で社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, to improve soil phosphorus (P) deficiency and increase crop production sustainably, we conducted joint research with Sokoine University of Agriculture, Tanzania. The objective is to evaluate the effect of intercropping and rhizobium inoculation on soil-plant P dynamics in dry tropical soils.

As main results, 1) Sharing the rhizosphere between the legume and maize improves the soil-plant P dynamics and improves the utilization efficiency of fertilized P, 2) Rhizobium inoculation improves the P acquisition capacity of pigeon pea root only under P fertilization, and 3) Rhizobium inoculation on intercropping was not significant in terms of P dynamics. From the above results, rhizosphere-sharing intercropping systems is effective for improving the soil-plant P dynamics in the tropical soil conditions. Further study for understanding the microbial community in intercropping rhizosphere must be important.

研究分野：土壌学

キーワード：混作 リン循環 持続可能性 根粒菌 アフリカ

1. 研究開始当初の背景

アフリカにおける慢性的な食料不足は未だ解決の糸口が見えず、特に半乾燥熱帯アフリカの飢餓人口は未だに増加している。『持続可能な開発目標 (SDGs)』の最優先課題の1つである「貧困と飢餓の撲滅」に向け、FAO (2011) は新パラダイムとして「持続可能な集約化」を提唱し、土壌保全と食料増産を両立させる技術開発の必要性を強調してきたが、未だ有効な技術は開発されていない。アフリカの生産性が低い要因には、当地の土壌が有する高いリン固定能に起因したリン不足が知られており、リン欠乏の改善は積年の課題であった。一方、近年の世界的なリン肥料価格の高騰もあり、アフリカ大陸内で産出される安価なリン資源 (低品位リン鉱石) の利用によるリン欠乏の解決が求められるものの、可溶化速度が遅く肥効の低いリン鉱石の普及は進まず、リン鉱石の可溶化促進技術の新規構築も重要な研究課題となっている。

当地で伝統的に行われてきたマメ科と主作物の混作は、作物残渣を単作よりも多く土壌へ還元可能なため、持続性という点で世界的に注目を浴びてきた農法であり、マメ科の窒素固定による窒素欠乏の改善や、干ばつ年でもマメ科作物の収量が確保できるセイフティーネット機能等が報告されている。加えて、特定のマメ科は通常の植物が利用できない難溶性リンを可給化・吸収することが確認されて以降、マメ科と主作物の混作を利用したリン利用効率の改善が着目されている。近年申請者は、タンザニアの気候・土壌条件化でキマメやササゲ等のマメ科作物は自身が吸収するよりも多い量の難溶性リンを可給化することを発見しており、これらの結果は混作によるマメ科と主作物の“根圏共有”がアフリカでの難溶性リンの農業利用に重要であることを示唆している。しかし、強風化土壌でマメ科と主作物の根圏共有の有無が難溶性リンの挙動も含めたリン循環や作物収量に与える影響を定量的に解明した事例は殆どない。加えて、10年以上にわたる自身の現地調査経験から、当地の混作技術 (根圏共有状況) は地域によって多様であり、現地共同研究者との議論でも、1穴に両作物の種子を播種する場合 (= 根圏共有型) と、20~30cmの畝間で別々に播種する場合 (= 根圏非共有型) とに大きく二分できること、リン欠乏の改善という視点に立った明確な混作栽培指針は国内に存在しないこと、等が判明している。そこで申請者は、未利用リン資源 (土壌中の難溶性リンとリン鉱石) を根圏共有型混作によって農業利用できないか、という着想に至った。加えて近年、粒菌の接種によりマメ科のリン可給化能が向上することも報告された。そこで、我が国が持つ根粒菌に関する知見・技術をタンザニアのマメ科作物に適用し、有用な根粒菌を探索・接種することでマメ科作物が持つ難溶性リン可給化能を向上できれば、混作による未利用リン資源の更なる農業利用が実現可能であると考えた。

2. 研究の目的

上記の背景を含めて、本研究では半乾燥熱帯畑作地において、混作による未利用リン資源の更なる農業利用を目的に以下の課題を行うことを目的とした。

課題1) マメ科と主作物の根圏共有は土壌作物間のリン循環および作物吸収量を改善するか?

課題2) 有用な根粒菌の接種はマメ科が持つ難溶性リン可給化能を向上するか?

課題3) 根圏共有型混作と根粒菌接種の導入はリン利用効率を改善するか?

なお、これらの目的の設定および研究遂行に当たっては、2020年度以降に発生したCOVID-19の蔓延およびその対策に伴い、研究期間中に当初計画していた現地海外調査の実施が困難になったため、現地共同研究者らとの議論を基に当初研究計画から一部修正をおこない、目的を設定し研究を遂行した。

3. 研究の方法

課題1) マメ科と主作物の根圏共有は土壌作物間のリン循環および作物吸収量を改善するか?

タンザニア・モロゴロの畑地土壌 (Ultisols) 用いて、Sokoine University of Agricultureの現地温室で2018年12月~2019年2月にかけて、60日間のポット試験を行った。根圏を共有した共有区 (NS区)、ポット内を37 μm 孔ナイロンメッシュで分けた Mesh区 (根圏の共有は無、溶質や菌系の移動は有; MS区)、プラスチックシートで分けた Solid区 (根圏の共有と溶質や菌系の移動の両方が無; CS区) の3処理 (図1) に、リン施肥 (0P、50P (50 P kg ha⁻¹)、100P (100 P kg ha⁻¹)) を組み合わせた9処理区で、トウモロコシ (MZ) とマメ科作物 (キマメ; PPとラッカセイ; GN) を1ポットに各1個体ずつ栽培した (各5連)。窒素環境をそろえるため、窒素は200 N kg ha⁻¹ 施肥した (図2)。栽培後、作物体 (地上部、地下部、GN子実) のリン吸収量と、根圏土壌および無栽培土壌 (コントロール) における Hedley 連続抽出法を用いた画分ごとのリン量を測定した。共有区の根圏土壌と地下部は、MZと各マメ科作物の根圏の区別が困難であったため、まとめて収穫・分析を行った。

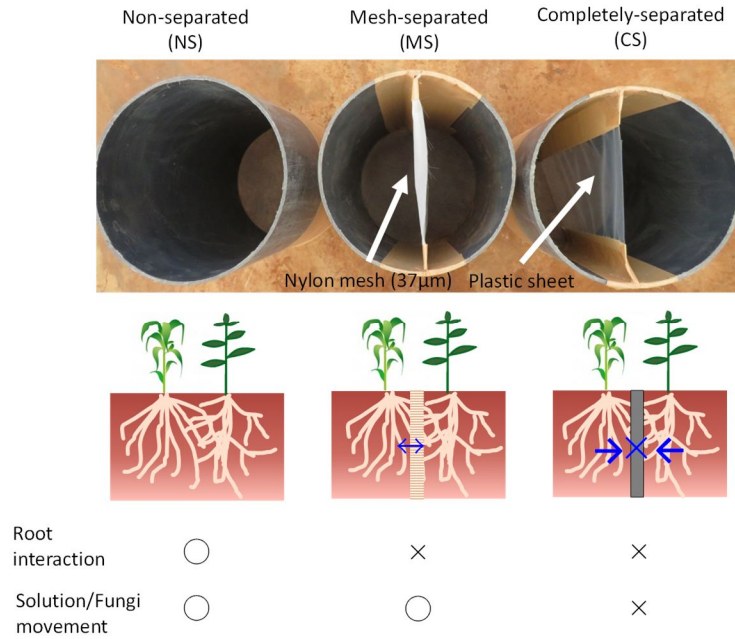


図1 . ポット試験を行うさいに利用した各種処理区とその処理が根圏共有および溶質・菌糸移動に及ぼす影響に関する概要図

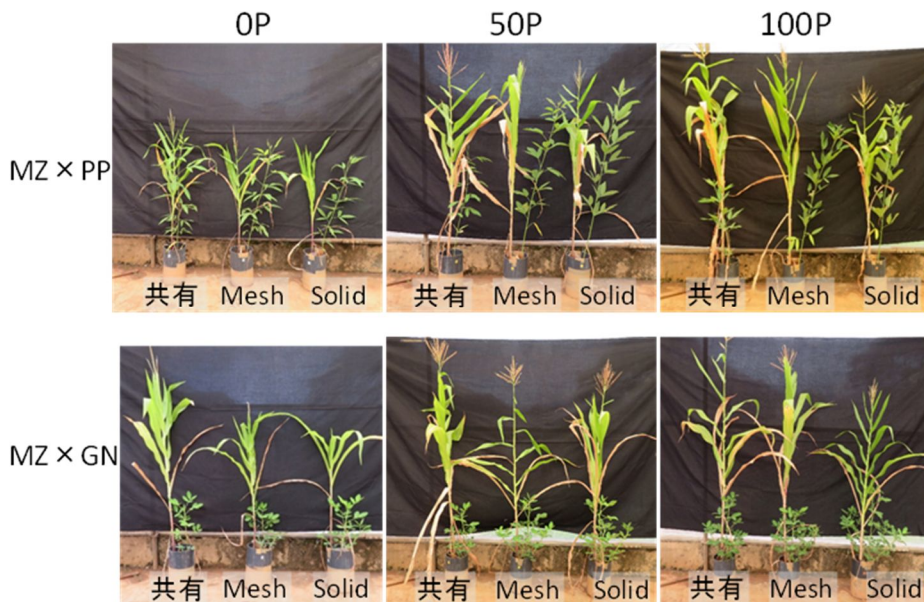


図2 . ポット試験を60日間実施したサンプリング時の写真。

課題2) 有用な根粒菌の接種はマメ科が持つ難溶性リン可給化能を向上するか？
 タンザニアの Ultisols と同じ土壌特性を有する沖縄県内の赤黄色土(リン吸着能が高く、リン含量が少ない未耕地土壌)を 1/10000 a ポットに充填し、キマメ(PP)を東京農工大学内のファイトトロンで70日間栽培した。根粒菌接種の有無(非接種区: -I、接種区: +I)、リン資材の種類と施肥量(無施肥区: 0P、過リン酸石灰 50 kg P ha⁻¹: 50SSP、リン鉱石 50 kg P ha⁻¹: 50RP、リン鉱石 100 kg P ha⁻¹: 100RP)の2×4=計8処理区を各5連で設置した(図3)。収穫後、植物体は部位別(葉・莖・根)に乾物重を測定し、各部位ごとのリン含量を測定することで、リン吸収量を求めた。また、根由来の酸性ホスファターゼ活性、有機酸を測定した。また、根圏土壌とバルク土壌を採取し、Hedley 連続抽出法を用いた画分ごとのリン量を測定した。本試験で用いた根粒菌は、予備試験としてキマメに接種効果がある根粒菌の選抜試験を実施し、最も接種効果が観測された *Bradyrhizobium elkanii* USDA61 とした。

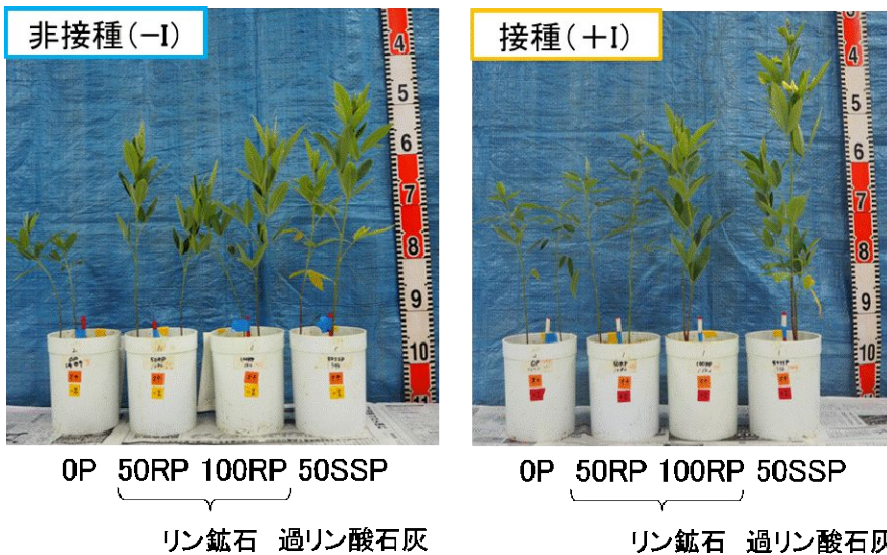


図3 . ポット試験を 70 日間実施したサンプリング時の写真。

課題3) 根圏共有型混作と根粒菌接種の導入はリン利用効率を改善するか？

タンザニアの Ultisols と同じ土壌特性を有する赤黄色土を、国際農林水産業研究センター・熱帯・島嶼研究拠点（沖縄県石垣市）内の下層土（40-50 cm 深）から採取した土壌を用いて、東京農工大学内のファイトロンでポット栽培試験を行った。供試植物にはキマメ (PP: *Cajanus cajan* (L.) Millsp.) とトウモロコシ (MZ: *Zea mays* (L.)) を使用し、供試する根粒菌は *Bradyrhizobium elkanii* USDA 61 を使用した。根粒菌接種の有無（非接種：-I、接種：+I）、リン施肥の有無（無施肥：0P、過リン酸石灰 50 kg P ha⁻¹：50P）、根圏共有に関する処理（単作：CS 区、混作：NS 区、図1参照）で 2×2×2=8 処理区、各 5 連で 85 日間栽培を行った。栽培終了後、植物体を回収し植物体乾物重、窒素 (N) 吸収量、P 吸収量を測定後、fertilized PUE を算出した: fertilized PUE(%) = (50P 区のポット当たり P 吸収量) + (0P-I 区のポット当たり P 吸収量) / (ポット当たり施肥 P 量) × 100。また、植物根の影響が及ぶと想定される根圏土壌と、その他の非根圏土壌を採取し、土壌の P 動態を分析するために Hedley 連続抽出法を行った。さらに、植物の P 可給化能を測定するために、収穫直後の植物体の根分泌物を回収し、有機酸分泌量を HPLC (High Performance Liquid Chromatograph) を用いて定量分析した。

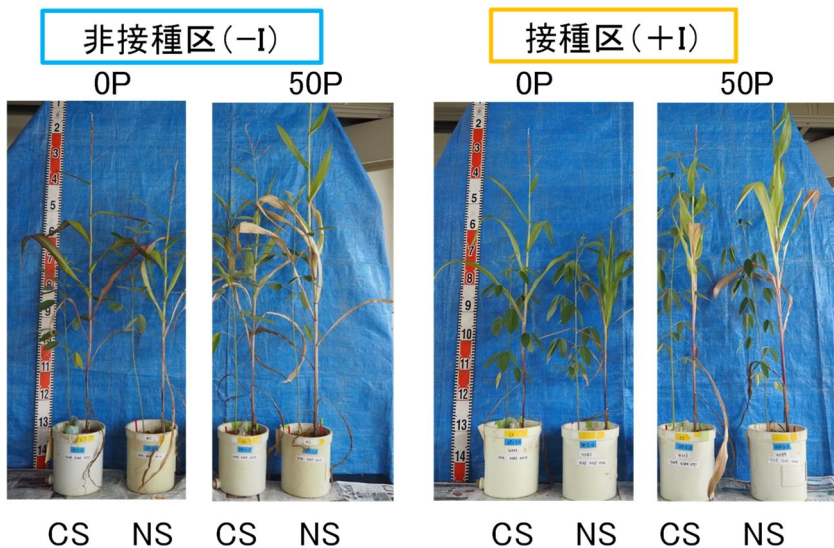


図4 . ポット試験を 85 日間実施したサンプリング時の写真。

4. 研究成果

課題1) 得られた結果の詳細は既に Sugihara et al. 2021 で国際誌に公表しているため、概要のみを述べる。タンザニアの畑作地において MZ とマメ科作物 (PP と GN) の根圏の共有が作物のリン吸収能に与える影響について結果、リン施肥 (50P および 100P) 条件下で、MZ と PP で根圏を共有した場合、ポット全体のリン吸収量およびリン利用効率が有意に増加した。その機構として、施肥由来リンを根圏共有部分に集積させることで効率的に施肥リンを吸収していたことが示唆された。一方、MZ と GN を混作した場合、根圏を共有してもポット全体のリン吸収量は有意に増加せず、条件によっては減少することが示された。これらの結果から、当地で施肥リンを最も効率よく利用するためには、MZ と PP の根圏を共有する混作方法が有効であるということが示された。そこで以下の課題2) 課題3) ではキマメ (PP) を利用して実験を行った。

課題2) 得られた結果の詳細は既に Yamamoto et al. 2022 で国際誌に公表しているため、概要のみを述べる。植物体リン吸収量は 50SSP 区および 100RP 区で、+I 区 > -I 区となり、一方で他の処理区の +I 区は -I 区よりも低い傾向にあった。有機酸分泌量は全てのリン施肥区で +I 区が -I 区を上回った一方 (1.6~2.3 倍)、ホスファターゼ活性は 50RP 区でのみ +I 区 > -I 区となった。根圏土壌におけるリン動態は、50SSP +I 区でのみ可溶性画分 (NaHCO₃-Pi) 及び難溶性画分 (NaOH-Pi) の無機 P 量が根圏 > バルクとなった。以上より、50SSP 区では根粒菌接種によって特に有機酸分泌量が増加することで、根圏土壌に SSP 由来の無機態リンが増加し、その結果、植物体リン吸収量が増加したと考えられる。一方、リン鉱石利用を行った 50RP および 100RP 区では、50SSP 区ほどの顕著なリン可給化 (溶解を含む) および根圏への集積は観測されなかった。課題1) 2) の結果を踏まえると、リン鉱石の溶解・可給化の推進にマメ科作物への根粒菌接種効果が与える影響はそこまで期待できないことが示唆された。そこで課題3) では、研究のターゲットを施肥リンの利用効率改善に絞って研究を行うこととした。

課題3) 得られた結果の多くはまだ未公表であり、現在投稿論文として準備を進めているため詳細なデータの記述は省略し、概要を述べる。土壌 P 動態は、50P 区の NS+I 区と CS+I 区で可溶性 P (Resin-P+NaHCO₃-Pi) と難溶性 P (NaOH-Pi) がバルク < 根圏、同じく 50P 区の NS -I 区で可溶性 P がバルク < 根圏となり、混作による根圏共有効果が顕著に観測された一方で、混作への根粒菌接種効果は明確でなかった。根の有機酸分泌量は、50P 区のキマメ単作では根粒菌接種に伴い増加した一方で (課題2) で観測された結果が今回も追認できた) 混作条件下では菌接種で有意に増加せず、むしろ減少した。最終的な植物体総 P 吸収量も、混作で増加した一方、混作への根粒菌接種では変化しなかった。以上から、本実験設定では、混作への根粒菌接種は土壌 作物間のリン動態および作物生育を改善しなかった。この原因は今のところ不明であるが、理由の1つとして、混作条件下の根圏共有区において、活性化した在来微生物と接種由来の根粒菌とが競合した結果、根粒菌接種効果が顕著に観測できなかったことが考えられる。今後は有望な接種菌株の探索と併せて、根圏微生物群集の解析なども行う必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sugihara Soh, Kawashita Tomomi, Shitindi Mawazo, Massawe Boniface, Tanaka Haruo	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamics of fractionated rhizosphere soil P and plant P uptake under maize/P-mobilizing legumes intercropping in strongly weathered soil of Tanzania	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2021.1911589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ratu Safirah Tasa Nerves, Teulet Albin, Miwa Hiroki, Masuda Sachiko, Nguyen Hien P., Yasuda Michiko, Sato Shusei, Kaneko Takakazu, Hayashi Makoto, Giraud Eric, Okazaki Shin	4. 巻 11
2. 論文標題 Rhizobia use a pathogenic-like effector to hijack leguminous nodulation signalling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-81598-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sarkodee-Addo Elsie, Yasuda Michiko, Gyu Lee Chol, Kanasugi Makoto, Fujii Yoshiharu, Ansong Omari Richard, Oppong Abebrese Samuel, Bam Ralph, Asuming-Brempong Stella, Mohammad Golam Dastogeer Khondoker, Okazaki Shin	4. 巻 10
2. 論文標題 Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) in Ghana: Effect of Regional Locations and Soil Factors on Diversity and Community Assembly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 559 ~ 559
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/agronomy10040559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Imai Kaoru, Sugihara Soh, Wasaki Jun, Tanaka Haruo	4. 巻 9
2. 論文標題 Effects of White Lupin and Groundnut on Fractionated Rhizosphere Soil P of Different P-Limited Soil Types in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/agronomy9020068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Saki, Okazaki Shin, Monica Nakei D., Ohkama-Ohtsu Naoko, Tanaka Haruo, Sugihara Soh	4. 巻 12
2. 論文標題 Rhizobium Inoculation Improved the Rhizosphere P Dynamics and P Uptake Capacity of Pigeon Pea Plants Grown in Strongly Weathered Soil Only under P Fertilized Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 3149 ~ 3149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy12123149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山本沙季、岡崎伸、Nakei D. Monica、田中治夫、杉原創
2. 発表標題 根粒菌接種とリン施肥がキマメの根圏土壌におけるリン動態に与える影響の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会・北海道大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原創・宮島奈々子・田中治夫・江沢辰広
2. 発表標題 アースキュラー菌根菌が土壌から獲得するリン形態の解明～土壌型・温度・リン施肥量に着目して～
3. 学会等名 菌根研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉原創、今井馨、大津直子、柴田誠、田中治夫
2. 発表標題 マメ科作物の特異的なリン可給可能に土壌の化学性が与える影響の解明・第3報
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河下知美、杉原創、Shitindi M、Massawe B、田中治夫
2. 発表標題 タンザニア畑作地における混作時の根圏共有が作物のリン吸収能に与える影響の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡崎 伸 (Okazaki Shin) (40379285)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授 (12605)	
研究分担者	柴田 誠 (Shibata Makoto) (40799607)	京都大学・地球環境学堂・助教 (14301)	
研究分担者	伊ヶ崎 健大 (Ikazaki Kenta) (70582021)	国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・生産環境・畜産領域・研究員 (82104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
タンザニア	Sokoine University of Agriculture		
フランス	INRA, UMR & SOL, Montpellier		