

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14941

研究課題名（和文）アルティソルとオキシソルにおける森林再生過程と土壌生態学的レジリアンスの比較研究

研究課題名（英文）Comparative study on forest regeneration process and ecological resilience on Ultisols and Oxisols

研究代表者

舟川 晋也（Funakawa, Shinya）

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：20244577

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：熱帯生態系中の窒素動態を規定する要因として、1) まず窒素固定/生態系への投入段階における植物-微生物間の共生関係の成立が、熱帯林において一般的に大きいと言われる窒素フラックスの成立には重要なこと（特にマメ科森林植生が卓越するカメルーン森林で顕著）、2) 土壌側の要因として土壌酸度（おそらく交換性Alレベル）が、森林の細根分布を規定することを通して、生態系の窒素回収戦略（どの層位で吸収するか、硝酸化成に対し抑制的であるかどうか等）が異なってくるだろうということが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、養分循環（窒素飽和/相対的窒素不足の解消）から評価した二次林再成立過程は、土壌酸性度、植生（種）遷移、硝酸化成能、マメ科植物-微生物共生関係の成立等様々な要因によって、その変遷の異なることが明らかとなった。予測的なことを述べれば、マメ科森林が卓越するカメルーンOxisolsでは、サバンナ化さえ回避すれば、二次林再生がより容易なことが示唆された。一方菌根共生の目立つ東南アジアUltisolsでは、どの時点で窒素不足の解消が達成されるのかはいまだ明らかではない。熱帯林再生へ向けた努力においては、少なくとも上記の点は意識されるべきである。

研究成果の概要（英文）：There are two major factors that control nitrogen dynamics in the forest ecosystems; that is, 1) the establishment of a symbiotic relationship between plants and soil microbes has a strong impact for nitrogen fixation and subsequent input of N into ecosystems and 2) soil acidity (possibly the level of exchangeable Al) could play an important role on N recycling strategy of the ecosystems by affecting plant root distribution in the soils.

研究分野：環境農学

キーワード：生態・生物多様性 熱帯林 森林再生 生態学的レジリアンス

1. 研究開始当初の背景

近年熱帯諸国における土地利用の変貌は激しく、森林の伐開や耕地化、プランテーション化等、いわゆる「森林破壊」の動きと並行して、一方では温室効果ガス排出抑制を目的とした荒地へ植林、森林回復への動きも目立っている。しかしながら、バイオマスにとどまらない生態系機能あるいは生物多様性をも含んだ「生態系の回復」とはどのように捉えられるべきなのか、それは一般的な記述が可能なのか、あるいは各生態系に個別のプロセスなのか、基本的なレベルでコンセンサスが得られているとはいえない。

2. 研究の目的

本研究では、特に窒素動態およびこれを支配する微生物学的プロセスに着目して、湿潤アジア Ultisols および中部アフリカ Oxisols の森林再生過程における物質動態の変化について検討を行った。熱帯林生態系再生過程を、植物-微生物系における共生関係の回復を契機とした物質動態系の再確立として捉えることによって、生態学的レジリアンスに含まれる個々のプロセスの普遍性、個別性、稀少性をそれぞれ明確に認識する方法論を確立するとともに、熱帯林再生の試みをよりの確に評価する視点を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、以下の研究から構成される。まず Oxisols の卓越するカメルーン熱帯林と、Ultisols が卓越するインドネシア熱帯林における窒素動態を比較するために、¹⁵N 安定同位体希釈法による総硝化速度を測定し、土壌の窒素濃度および pH が両熱帯林土壌における総硝化速度に与える影響について調べた。一方で、カメルーンの Oxisols と Ultisols および Oxisols の天然林、サバンナ、耕地において、熱帯林土壌生態系の物質動態（特に窒素）に関する現地実測を行った。さらに、カメルーン Oxisols のカカオ二次林成立過程における窒素動態の変遷に関し現地実測を、またタイ Ultisols の焼畑移動農耕休閑林遷移過程における窒素動態の変遷に関し、¹⁵N 安定同位体希釈法による総量評価を行った。

4. 研究成果

4-1. カメルーンとインドネシアの熱帯林土壌において土壌の窒素濃度および pH が硝化速度に与える影響

【背景】 陸域生態系の多くは窒素制限下にある一方で、熱帯林生態系では窒素が開放的に循環しており、リターによる窒素投入量および溶脱による窒素損失量大きいことが明らかになっている (Hedin et al., 2009; Vitousek & Sanford, 1986)。同様に熱帯林土壌では、硝化速度や無機化速度も他の気候帯林と比べて大きいことが報告されている (Vitousek & Matson, 1988)。このような熱帯林における窒素の高い形態変化速度は、基質可給性が高い(窒素が豊富である)ためと考察されてきたものの、実際に検証されてはこなかった。加えて熱帯林の多くは酸性土壌を有しているにも関わらず、この低 pH 条件が微生物による窒素の形態変化に及ぼす影響について、議論されてこなかった。特に硝化反応は低 pH 下で顕著に抑制されることが知られており、酸性の鉍質土層よりも pH の高い有機物層(0層)の方が活発な硝化が確認された事例も過去には報告されている (Persson & Wiren, 1995)。そこで本研究では、カメルーンとインドネシアの熱帯林土壌において鉍質土層と0層の両方の硝化速度を測定し、全窒素濃度(基質可給性)と pH の2つの因子が硝化速度に及ぼす影響を明らかにすることを研究の目的とした。

【方法】 窒素固定を行うマメ科樹種が優占するカメルーンの熱帯林3サイトと、窒素固定を行わないフタバガキ科樹種が優占するインドネシアの熱帯林3サイトにおいて、0層と鉍質土層(0-5 cm, 5-15 cm)の計3層位から4反復で土壌を採取した。実験では、全窒素濃度と pH、総硝化速度を測定した。総硝化速度は、¹⁵N 安定同位体希釈法による室内静置実験(24時間, 25℃)によって算出した。

【結果と考察】 鉍質土層と0層の両方において、全窒素濃度はカメルーンの熱帯林の方がインドネシアよりも高く、優占樹種(窒素固定能)の違いが反映された結果となった。鉍質土層では、総硝化速度と全窒素濃度の間に正の相関が確認された一方で、いずれも同様に低い値を示した pH とは相関が見られなかった(図1)。そのため、同様に低 pH 領域であった鉍質土層では、硝化速度は全窒素濃度によって規定されたと考えられた。一方0層では、総硝化速度は全窒素濃度と pH の両方と正の相関を示し、どちらも硝化速度の規定因子であったと考えられた(図2)。ただし、pH と全窒素濃度の間にも正の相関が見られ ($r = 0.90$)、両因子は連動していた。これはマメ科植物のリターには窒素とともに塩基も多く含まれており (Tang & Yu, 1999)、カメルーンの0層では高い塩基含量により pH が高くなり、窒素濃度と連動したためと考えられた。また土壌の層位間で比較すると、カメルーンの熱帯林では0層の方が鉍質土層よりも総硝化速度が大きかった一方で、インドネシアの熱帯林では総硝化速度は層位間で同程度であった。カメルーンでのみ0層で活発な硝化が確認された理由としては、養分に富んだマメ科樹種のリターにより高い窒素濃度と pH を有する0層が形成され、硝化反応に適した条件であったためであると推測された。以上の結果から、熱帯林土壌における総硝化速度は鉍質土層と0層の両方で全窒素濃度と正の相関を示し、土壌中の窒素の可給性が硝化速度を規定していると考えられ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

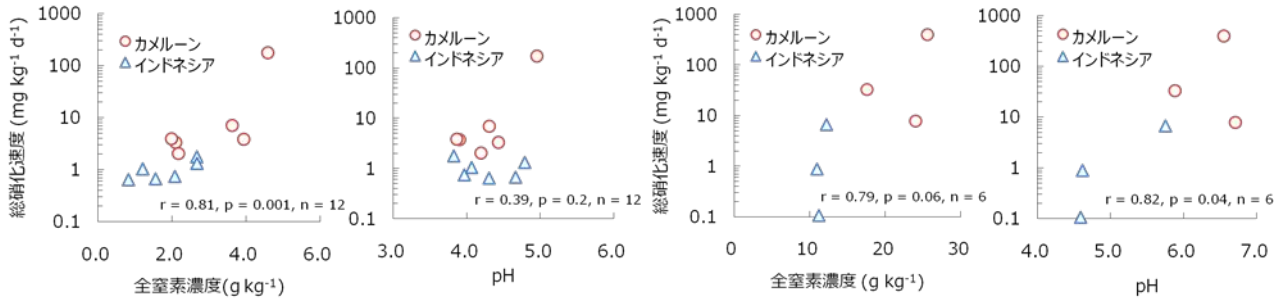


図1. 鈹質土層における全窒素濃度およびpHと総硝化速度の関係

図2. 0層における全窒素濃度およびpHと総硝化速度の関係

た。また窒素投入量の多いカメルーンの熱帯林では0層の硝化速度が大きく、0層の硝化反応も熱帯林における窒素循環に関与している可能性が示唆された。

4 - 2 . カメルーン熱帯林における物質動態：Oxisols と Ultisols および Oxisols の天然林，サバンナ，耕地の比較

【背景】強風化土壌が分布するアフリカ熱帯林やその周縁部に広がるサバンナでは広く焼畑農業が営まれるが、今後商業的農業が浸透する前に持続的な農地利用法を確立する必要がある。このような目的のもと、本研究ではカメルーン南東部の熱帯林、サバンナおよび耕地における土壌生態系プロセスを調査した。具体的には、当地域に代表的な Oxisols と Ultisols において、森林-土壌間の元素循環を定量評価することによって土壌型の違いが熱帯林の生態系プロセスに及ぼす影響を調べるとともに、森林-サバンナ境界帯とほぼ分布が重なる Oxisols の森林・サバンナ・耕地における物質動態を比較することによって耕地開墾前の植生が養分損失に及ぼす影響を調べ、その上で、土壌養分の持続性の観点から適切な農地利用を検討した。

【方法】コンゴ盆地熱帯林の北西縁に位置するカメルーン共和国において、天然林の比較として、Ultisols 地帯の南部 MV 村 (A 層の pH : 3.5, 0-30 cm の交換性 AI : 126 kmol_c ha⁻¹) および Oxisols 地帯の東部 AD 村 (A 層の pH : 4.2, 0-30 cm の交換性 AI : 59.8 kmol_c ha⁻¹) 計 2 地点の森林を、また植生・土地利用間の比較として、AD 村天然林、サバンナ性二次林、耕地を調査対象地とした。天然林では、いずれの森林もマメ科窒素固定樹種が樹冠を優占していた。降雨及び林内雨、土壌溶液 (0, 15, 30 cm 深) を 2 年間毎月採取し、それぞれ溶存態窒素濃度を測定した。Hydrus-1D で計算した下方浸透量と濃度の積より浸透フラックスを計算した。また、リターフォールを毎月採取し、窒素フラックスを測定した。

【結果と考察】試験期間中の降水量は MV で 1,665 mm yr⁻¹、AD で 1,515 mm yr⁻¹ となり、両地点とも 2~3 か月間の明瞭な乾季を伴った。その結果、1) Oxisols では鈹質土層へ浸透する養分フラックスが大きいのに対し、Ultisols では 0 層に集中した植物根によって養分の大部分が吸収されていたことから、当地域の森林-土壌間の養分循環様式は、土壌型に起因する土壌酸度の違いが土壌断面内の細根分布を規定することによって制御されている可能性が示された。また 2) 森林-サバンナ境界帯の Oxisols では、天然林に比してサバンナ性二次林において窒素フラックスが遙かに小さくなること、また耕地化後においても元の植生の養分循環様式を反映され、森林を開墾した方がサバンナを開墾した場合に比べて作土層から流亡する養分量 (硝酸態窒素と陽イオン) が大きいことが明らかとなった。

4 - 3 . カメルーン・カカオ林遷移過程における窒素動態の変化

【背景】カメルーン南東部の熱帯林地帯では、農民が小規模に森林を開墾し、カカオを栽培することがある。当地域のカカオ栽培では開墾時に庇陰樹を残すため、開墾に伴う急速な窒素の溶脱及びそれに伴う塩基類の損失が抑制されると考えられる。開墾後もカカオの成長と庇陰樹の樹勢回復に伴う養分吸収及び土壌へのリター投入が年数と共に増加することが想定されるが、何年で養分循環が開墾前の森林の状態に戻るのかは明らかでない。また当地域ではキャッサバも栽培される。キャッサバは栽培時に樹木を残さず森林を開墾して連作されるため、カカオ栽培より養分が流出しやすいと考えられる。特に当地域には風化の進んだオキシソルが分布し、養分の損失は土壌養分の持続性の点から重要な問題である。そこで本研究では、カカオ林における養分フラックスの経年変化と、キャッサバ畑における養分フラックスとの差異を調べることで、カカオ栽培が土壌生態系の養分フラックスに及ぼす影響を量的に明らかにすることを目的とした。

【方法】カメルーン南東部のグリベ村において、森林区、森林開墾後 1, 2, 4, 6, 20 年目のカカオ林区 (以下 CC1, CC2, CC4, CC6, CC20)、開墾後 4 年目のキャッサバ畑区 (以下 CA4) の計七区を設置した。リター、林内雨及び土壌 30 cm 深の土壌溶液を 5 連ずつ 1 年間毎月採取し主要元素濃度を測定した。それぞれ重量との各元素濃度の積をフラックスとし、リターと林内雨の和を養分投入フラックスと定義した。土壌 30 cm 以深への浸透フラックスは降水量をもとに計算した浸透水量と濃度の積とし、浸透フラックスと投入フラックスの差を損失フラックス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

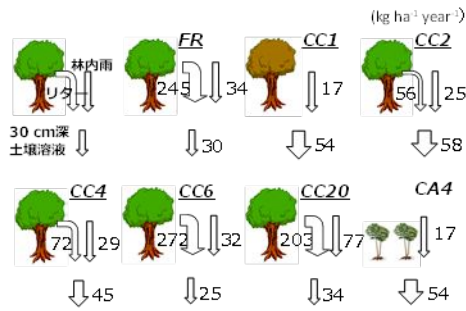


図3 サイト毎の窒素フラックス

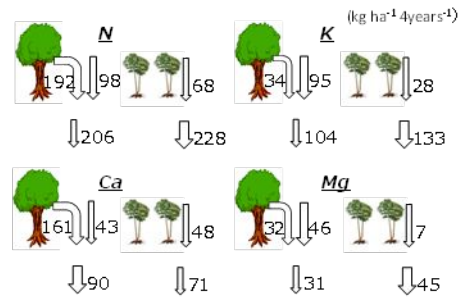


図4 開墾後4年目までのフラックスの積算 (左: カカオ林, 右: キャッサバ畑)

とした。

【結果と考察】カカオ林における窒素投入フラックスは増加した。これは開墾後のカカオの成長と庇陰樹の樹勢の回復によるものと考えられる。一方、土壌30 cm以深への窒素浸透フラックスは開墾直後に増加し、CC6までに森林と同程度に戻った(図3)。また、カチオン(K+Ca+Mg)の投入フラックスもリターの増加に伴って増加した。浸透フラックスも窒素同様、開墾直後に増加し(63 kg ha⁻¹ yr⁻¹)、CC6までに森林と同程度(43 kg ha⁻¹ yr⁻¹)に戻った。これは開墾によって減少した植物根が6年目までに森林と同程度に増加したためと考えられる。

CC4とCA4におけるN, K, Ca, Mgの浸透フラックス(kg ha⁻¹ yr⁻¹)はそれぞれ45, 35, 4, 23(以上CC4), 57, 33, 11, 18(以上CA4)であり、投入フラックスはそれぞれ101, 72, 19, 20(以上CC4), 17, 7, 12, 2(以上CA4)となった。CA4における窒素の損失フラックスは土壌0-30 cmの全窒素の0.8%, カリウムに関しては0.4%に相当した。また、両サイトにおける浸透フラックスは同程度であったものの、CC4の方で投入フラックスが高かったことから、CC4ではCA4に比べて樹木根による養分の吸収が多かったと考えられた。カカオ林とキャッサバ畑における養分フラックスを開墾後4年目まで積算すると、キャッサバ畑の方が養分の損失が多かった(図4)。本研究では浸透フラックスを土壌30 cm深で測定したが、カカオ林では30 cmより深い層にも存在する植物根による養分の吸収が予想される。よって、より深い系で考えるとカカオ林では損失フラックスが減少すると考えられる。

以上より、カカオ林では開墾後6年目までに養分フラックスが森林と同程度に戻ること、キャッサバ畑と比較してカカオの成長と庇陰樹の回復により養分損失が緩和されることが明らかとなった。

4 - 4 . タイ焼畑の焼畑移動農耕二次林遷移過程における窒素動態の変容

【背景】焼畑農業において、火入れは土壌中の窒素の形態変化プロセスに影響を及ぼす。先行研究により、焼畑-休閑サイクルにおいて、土壌中の無機態窒素プールが火入れ後にどのように経時変化するかは明らかとなっているが、その変動を規定する無機態窒素の生成・消費速度は、特に熱帯において、未だ明らかでない。そこで本研究は、タイ国北部の焼畑-休閑サイクルにおいて、土壌中の無機態窒素プールとともに総無機化・硝化速度を測定し、その制御要因を検討する事で、無機態窒素プールの変動要因を明らかにすることを目的とした。

単位: プール (mg kg⁻¹), 速度 (mg kg⁻¹ d⁻¹)

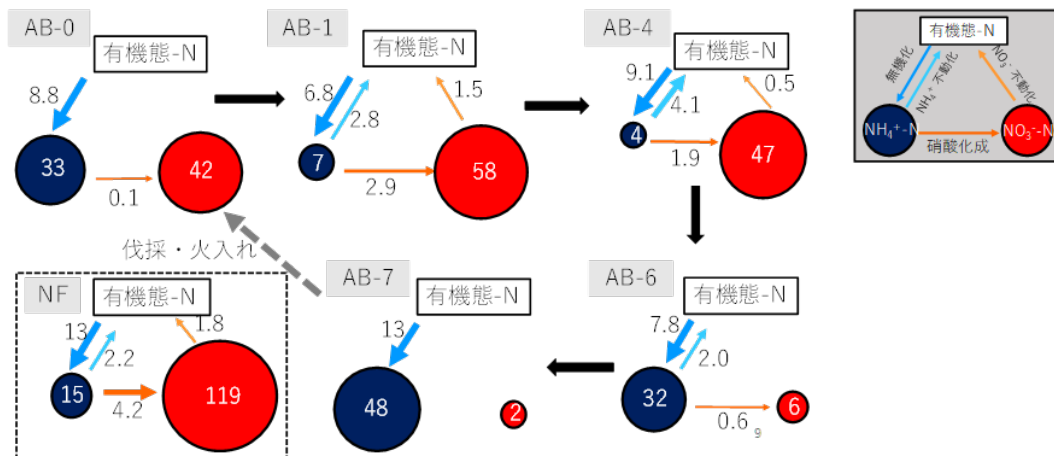


図5 焼畑-休閑サイクルにおける無機態窒素プールおよび総窒素形態変化速度の経時変化

【方法】タイ国北部で一般的に見られる、火入れ後1年耕作・6年休閑の計7年にわたる焼畑サイクルにおいて、火入れ直後の耕地(AB0)と火入れから1, 4, 6, 7年目の休閑地(AB1, AB4, AB6, AB7)及び隣接する自然林(NF)の計6地点から表層土壌(0-10cm)を採取し、総無機化・硝化速度を¹⁵N安定同位体希釈法を用いた室内静置実験(24h, 25℃)によって測定した。

【結果と考察】硝酸態窒素プールは、火入れによってAB7の2 mg kg⁻¹からAB0の42 mg kg⁻¹に増加し、AB1でさらに増加した後、AB7にかけて減少した(図5)。一方アンモニウム態窒素プールは、AB7の48 mg kg⁻¹からAB0の33 mg kg⁻¹に減少し、AB1でさらに7 mg kg⁻¹まで減少した後、AB6からAB7にかけて増加した。総硝化速度はAB7からAB0までほぼ0 mg kg⁻¹ d⁻¹と一定であり、AB1で2.9 mg kg⁻¹ d⁻¹まで増加した後、AB7まで減少を続けた。総無機化速度は変動せず、土壌中の全窒素濃度と正に相関した($r = 0.78, p < 0.01$)。一方、総硝化速度は土壌C/N比と負に相関し($r = -0.60, p = 0.052$)。塩基飽和度と正に相関した($r = 0.53, p < 0.10$)。

以上より、タイ国北部の焼畑移動農耕の耕作/休閑サイクルにおいては、土壌中の無機態窒素プールを規定するのは土壌C/N比と塩基飽和度に制御されている総硝化速度であることが明らかとなった。

4 - 5 . まとめ

本研究によって得られた主要な成果は、以下の通りである。

- 1) ¹⁵N安定同位体希釈法を用いてカメルーンOxisolsおよびインドネシアUltisolsにおける総硝化速度を比較検討した結果、熱帯林土壌における総硝化速度は鉱質土層と0層の両方で全窒素濃度と正の相関を示し、土壌中の窒素の可給性が硝化速度を規定していると考えられた。また窒素投入量の多いカメルーンの熱帯林では0層の硝化速度が大きく、0層の硝化反応も熱帯林における窒素循環に関与している可能性が示唆された。
- 2) 一方現地熱帯林における物質動態の実測によれば、0層への窒素フラックスが大きいカメルーン熱帯林における植物-土壌間の窒素循環様式は、天然林では土壌酸度(おそらく表層土壌の交換性Alレベル)が土壌断面内の細根分布に影響することによってOxisolsとUltisolsで異なること、また二次林成立過程ではサバンナ性二次林がマメ科樹木に遷移することによって、窒素フラックスが飛躍的に増大することが明らかとなった。
- 3) カメルーンのカカオ二次林における物質動態の遷移を実測した結果、カカオ林では開墾後6年目までに養分フラックスが森林と同程度に戻ること、キャッサバ畑と比較してカカオの成長と庇陰樹の回復により養分損失が緩和されることが明らかとなった。
- 4) タイ国北部の焼畑移動農耕の耕作/休閑サイクルにおいては、土壌中の無機態窒素プールを規定するのは土壌C/N比と塩基飽和度に制御されている総硝化速度であることが明らかとなった。
- 5) 以上個々のサブテーマで得られた知見を総合すると、熱帯生態系中の窒素動態を規定する要因として、1) まず窒素固定/生態系への投入段階における植物-微生物間の共生関係の成立が、熱帯林において一般的に大きいと言われる窒素フラックスの成立には重要なこと(特にマメ科森林植生が卓越するカメルーン森林で顕著)、2) 土壌側の要因として土壌酸度(おそらく交換性Alレベル)が、森林の細根分布を規定することを通して、生態系の窒素回収戦略-どの層位で吸収するか、硝酸化成に対し抑制的であるかどうか等が異なってくるだろうということが明らかとなった。
- 6) 現在、これらを検証するために、ベトナム中部のOxisols, Ultisolsに成立する自然林とアカシア二次林における諸生態系プロセスを調査中である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Sugihara S, Fujimori Y, Shibata M, Sawada K, Tanaka H, Mvondo Ze A, Araki S, Kosaki T, Funakawa S 2018: Effects of 3-year cultivation on the soil nutrient status in a tropical forest and savanna of Central Africa, as determined by the microbial responses to substrate addition. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(6), 728-735, DOI: 10.1080/00380768.2018.1517585. 査読有 .

Shibata M, Sugihara S, Mvondo Ze A, Araki S, Funakawa S 2018: Effect of original vegetation on nutrient loss patterns from Oxisol cropland in forests and adjacent savannas of Cameroon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 257, 132-143, DOI: 10.1016/j.agee.2018.01.031. 査読有 .

Sugihara S, Shibata M, Mvondo Ze A, Araki S, Kosaki T, Funakawa S 2017: Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63, 616-627, DOI: 10.1080/00380768.2017.1403841. 査読有 .

Shibata M, Sugihara S, Mvondo Ze A, Araki S, Funakawa S 2017: Nitrogen flux patterns through Oxisols and Ultisols in tropical forests of Cameroon, Central Africa. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63, 306-317, DOI: 10.1080/00380768.2017.1341285. 査読有 .

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

Watanabe T, Hasenaka Y, Hartono A, Sabiham S, Nakao A, Funakawa S 2017: Parent materials and climate control secondary mineral distributions in soils of Kalimantan, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 124-137, DOI: 10.2136/sssaj2016.08.0263. 査読有.

〔学会発表〕(計 17 件)

Watanabe T, Lyu H, Funakawa S 2018: Weathering sequence of clay-size minerals based on weathering index and silicic acid activity. 21st World Congress of Soil Science, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2018.

Watanabe S, Shibata M, Hartono A, Watanabe T, Araki S, Funakawa S 2018: Nitrification in mineral and organic horizons of tropical forest soil: Comparison between Cameroon and Indonesia. 日本生態学会, 札幌, 2018年3月.

野中瞳, 柴田誠, 荒木茂, 舟川晋也 2017: カメルーン南東部のカカオ畑と一年生作物連作畑における窒素損失量の比較. 日本土壌肥料学会関西支部講演会, 奈良, 2017年12月.

柴田誠, 杉原創, Mvondo-Ze AD, 荒木茂, 舟川晋也 2017: 中部アフリカの土壌型を異にする熱帯林における窒素動態 - オキシソルとアルティソルの比較. 日本土壌肥料学会, 仙台, 2017年9月.

渡辺伸一, 柴田誠, 藤井一至, Arief Hartono, 渡邊哲弘, 荒木茂, 舟川晋也 2017: リターによる窒素投入量が異なる熱帯林土壌の総硝化速度 - カメルーンとインドネシアを事例として. 日本土壌肥料学会, 仙台, 2017年9月.

Sansompaisarn N, Shibata M, Funakawa, S. 2017: Gross Nitrogen Transformation Rates under Different Land Use Stages of Shifting Cultivation in Northern Thailand. 日本ペドロロジー学会, 和歌山, 2017年3月10日.

〔図書〕(計 1 件)

Funakawa, S. (Ed) 2017: Soils, Ecosystem Processes, and Agricultural Development: Tropical Asia and Sub-Saharan Africa. Springer, pp.392, ISBN: 978-4-431-56482-9.

〔その他〕

ホームページ等: <http://www.soils.kais.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 渡邊 哲弘

ローマ字氏名: WATANABE, Tetsuhiro

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院地球環境学堂

職名: 助教

研究者番号(8桁): 60456902

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。