

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01858

研究課題名(和文) 森林生態系のリン循環に及ぼすテフラの影響

研究課題名(英文) Influences of the deposition of volcanic tephra on the phosphorus cycling of forest ecosystems

研究代表者

北山 兼弘 (Kitayama, Kanehiro)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：20324684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本列島では、テフラの降下が地質学的スケールで頻繁かつ広範に生じている。テフラには生元素として最も重要なリンが豊富に含まれるため、その降下は森林にリン施肥効果をもたらす、物質循環に影響を及ぼしうる。日本列島の自然林20ヶ所から土壌を採集し、テフラ加入量の指標として非晶質物質の濃度を選択溶解法により決定した。さらに、土壌リンの画分と濃度を逐次抽出法により決定した。森林生態系の非晶質物質の濃度は、火山からの距離などに応じて大きな変異を示し、土壌全リン濃度と有意な正の相関関係を示した。このことから、テフラの降下が森林生態系にリン施肥効果を及ぼし、生態系の維持に効いていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陸域生態系の物質循環に与えるテフラの影響は、これまでほとんど研究されてこなかった。テフラは生命にとって必須のリンを一次鉱物として含有しリン供給源として働く可能性がある一方、テフラから生成される土壌鉱物(非晶質物質)はリン酸を強く吸着し植物にリン欠乏を生じさせる可能性もある。このどちらの効果が卓越しているのかは解明されていなかった。本研究から、テフラの加入が森林生態系にリンを施肥する効果を持ち、樹木がこれを利用することで森林生態系が持続している可能性を科学的に示した。火山噴火は災害をもたらす一方、自然生態系に栄養塩を供給する大きな生態系サービスを担っていることを示した。

研究成果の概要(英文)：A huge amount of volcanic tephra has been intermittently added to forest ecosystems in subduction zones such as in Japan through its geological time. Tephra contains primary-mineral phosphorus, which is one of the most important biophilic nutrients, and tephra fall might have supplied a significant amount of phosphorus to the ecosystems. However, this hypothesis has not been tested. We collected soils from a total of 20 natural forests throughout Japan and determined the concentration of amorphous minerals as an index of tephra fall. The concentration of amorphous minerals varied greatly, mostly depending on the distance to a nearby volcano, and significantly correlated with the concentration of soil total and available phosphorus. This finding suggests that tephra fall provides a substantial amount of phosphorus to forest ecosystems and biogeochemically maintains the forest ecosystems in Japan.

研究分野：森林生態学

キーワード：生態学 環境変動 土壌学 環境分析 植物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本のような沈み込み帯に連なる火山は、地質学的年代スケールでは頻りに噴火を繰り返し、スコリアや火山灰などのテフラを広域に飛散させてきた。図1は、日本における、第三紀以降に降り積もった、地質学的によく知られたマーカーとなるテフラの分布を示す。例えば、7300年前に鹿児島島の喜界カルデラから放出されたアカホヤ火山灰(図1のK-Ah)は仙台市付近まで広く堆積している。テフラは、ガスとして生態系に加入する炭素と窒素以外のミネラルを豊富に含み、生態系へのミネラル供給源として機能している。このうち、リン、Ca、K、Mgなどの必須元素は特に多く含まれ、テフラから派生する土壌にはこれらのミネラルが豊富に含まれる。従って日本の森林生態系の多くがテフラからミネラル供給を受けている可能性が高い。

海外の先行研究から、溶岩上の長期一次遷移においては、Ca、K、Mgなどの陽イオンとリンは異なる長期動態を示すことが明らかにされている

(Chadwick et al. 1999)。鉱物風化に伴い、陽イオンは比較的早い段階で土壌から溶脱して系外に流出するが、その一方で海水起源の陽イオンが降水を通して加入するので、長期的にこれらの陽イオンが欠乏することは少ない。これに対して、リンは土壌粒子への吸着性が高く系外に失われにくいものの、土壌生成に伴って形成される土壌鉱物との強い結合によって植物や微生物への可給性は著しく低下していく。このため、テフラなどの再加入がなければ、やがては森林生態系の物質循環はリン欠乏によって律速されると考えられる。しかし、リンに律速される森林生態系は日本ではほとんど知られていない。これは、日本の多くの森林生態系がテフラからリンの供給を受けているため、と考えられる(作業仮説)。しかし、驚くことに、世界の沈み込み帯において噴火が頻りに生じているにもかかわらず、テフラの加入が森林生態系の栄養動態にどのような影響を与えているのか、研究例が世界的にほとんど無い。

一方、上述の作業仮説に反し、農業生態系では、テフラの加入がリンの不動化(土壌への強い吸着)を通してリン欠乏を引き起こす事が多く指摘されている。これは、火山灰の風化によって形成されるアロフェン等の非晶質二次鉱物やアルミニウム・腐植複合体がリン酸と強く結合し、難溶化するためである。このため、火山灰土壌には全リンが多く含まれるにもかかわらず、農業生産にリン欠乏を引き起こすとされる。以上のように、テフラの加入は森林生態系に「全リンの施肥効果」として働く可能性がある一方で、「リン酸吸着によるリン欠乏」を引き起こす可能性もある。しかし、実態は明らかではない。

私たちはこれまで、テフラの加入が森林生態系に「全リンの施肥効果」をもたらしていることや、森林樹木がテフラから供給されるリンを獲得している可能性を示してきた。例えば、7300年前のアカホヤ火山灰が堆積した屋久島の森林生態系において、土壌の全リン濃度と非晶質鉱物が有意な正の相関を示すこと、及び全リン濃度と森林のリン欠乏度は負の関係を示すことを見いだした(Mukai, Aiba & Kitayama 2016)。このような傾向が広く認められ

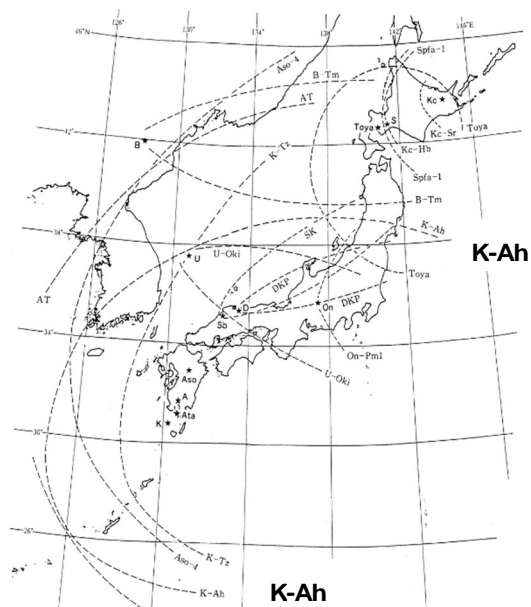


図1. テフラの分布 (Machida 1999 より)

るのであれば、日本をはじめとする沈み込み帯の森林生態系の多くは、テフラからの全リン加入によってリン制限を免れていることになる。

2. 研究の目的

日本では、広域テフラ・データが世界で最も充実しており、テフラの加入頻度や加入後経過時間が様々に異なる森林生態系が存在する。そこで本研究では、日本を対象として、テフラが森林生態系のリン循環に及ぼす影響を生物地球化学的に解明することを目的とした。特に、1) 日本の亜熱帯から亜寒帯に分布する自然林生態系を網羅的に調べ、テフラによる土壌へのリン供給と森林の生産性(リン制限)の関係を解明し、さらに2) 火山灰土壌に適応した日本の樹木が難溶性リンを溶解・獲得する能力を評価する、ことの2点を目的とした。

3. 研究の方法

環境省の長期生態系モニタリング・プログラム(モニタリング1000サイト)に登録されている、日本の亜熱帯から亜寒帯にかけた自然林生態系を対象にし、土壌の無機成分およびリン画分を分析し、テフラに起源するリン化合物の形態と量を明らかにし、作業仮説を検証した。

3-1. テフラが森林生態系に及ぼす生物地球化学的効果の評価

テフラによる森林へのリン酸供給を図2のようにモデル化し、これを検証した。【初期】まず、テフラに一次鉱物として含まれるリン酸Ca(アパタイト)は、植生遷移の過程で酸性化が進むにつれ徐々に溶け出し、樹木に吸収される。リン酸Caは、数千~数万年の時間でそのほとんどが溶出する。一方、テフラ風化から溶出したAlとSiの重合からプロトイモゴライト、アロフェン等の非晶質二次鉱物が生成される。【安定期】数千年かけて、これら微細で比表面積の大きい非晶質鉱物が卓越する土壌(アロフェン質黒ボク)が形成すると、土壌中で可溶化したリン酸(植生から土壌に還元されたリン酸も含む)の大半は、非晶質鉱物に強く吸着される。しかし、吸着したリン酸も、土壌のpH・酸化還元条件や根や微生物の生産する有機酸によっては、可溶化して樹木に吸収される。つまり、テフラがある程度の頻度で森林に供給されると、以上の地球化学的プロセスが繰り返されることになり、森林生態系内に可溶性リンが保持される。【老齢期】数十万年間の風化を受けた土壌では最終的に結晶性の高いFe・Al酸化物が卓越する(例: 沖縄県の赤色土)。リン酸はこれら酸化物に物理化学的に強く吸蔵され、可溶化が妨げられる。この過程により、やがては真のリン欠乏が発達する。このような形態のリンを吸蔵態リンと呼ぶ。すなわち、長期間テフラの供給がない場合、吸蔵態リンが卓越するようになり、森林生態系では樹木がリン欠乏によって律速される。

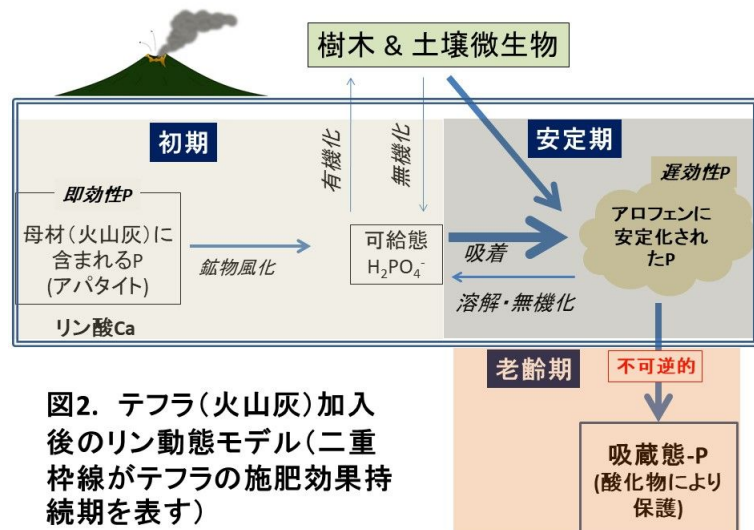


図2. テフラ(火山灰)加入後のリン動態モデル(二重枠線がテフラの施肥効果持続期を表す)

上記作業仮説が正しければ、以下の 2 点が成り立ち、これらの検証によってテフラによる森林へのリン酸供給機能を明らかにできる。1) 土壌中で火山ガラスが融解し、アロフェン等の非晶質鉱物が卓越する時期(安定期)には、非晶質鉱物量が土壌中のリン酸濃度を定める。2) 一方、火山ガラスもアロフェンも少ない、土壌風化がさらに進行した森林生態系では(老齡期) 土壌中の全リンの濃度が低下し、かつ全リンに占める吸蔵態リン(難溶性で生物が利用できないリン)の比率が増加する。

図 2 のモデルの検証を、日本の亜熱帯から亜寒帯にかけての自然林生態系を対象にし、生物地球化学的手法により進めた。環境省の長期生態系モニタリング・プログラム(モニタリング 1000 サイト)に登録されている、日本の亜熱帯から亜寒帯にかけて、自然林生態系合計 20 サイトから表層と鉱物質土層から定量的に土壌を採集した。採集地の概要を図 3 に示す。採集した土壌は冷蔵して京大の実験室に持ち帰った。新鮮土壌の一部を用い、そのリン画分を Tiessen & Moir(1993)の連続抽出分析法により決定した。新鮮土壌の一部は風乾保存した。火山灰(テフラ)風化から生成した非晶質鉱物量については、風乾土壌を選択溶解法(酸性シュウ酸抽出)により分析し、濃度を決定した。最後に、非晶質鉱物濃度とリン酸 Fe・リン酸 Al 濃度の相関関係を調べ、土壌全リンに占める吸蔵態リンの割合を求め、図 2 のモデルを検証した。

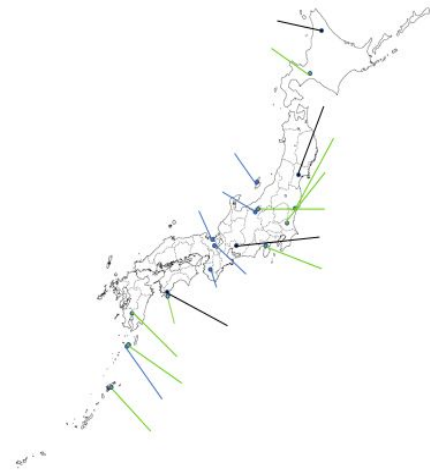


図 3 . 土壌採集行った調査地

3 - 2 . 樹木によるアロフェン非晶質鉱物に吸着したリン酸の溶解能と獲得能

日本の自然林の樹木種が非晶質鉱物に吸着したリン酸を獲得できるか、そしてその場合のメカニズムについて、以下の実験により検証した。アロフェンに吸着したリン酸を溶解する物質として、樹木の細根から滲出する有機酸が考えられた。細根から滲出する有機酸の定性・定量を行うため、Phillips et al. (2008)の方法により、滲出する有機酸を採取した。実験サイトは屋久島の低地常緑樹林 3 ヶ所であり(標高 170、200 および 280 m) これらの森林はアカホヤ火山灰の堆積によって形成された火山灰土壌に成立している。3 サイトに共通して優占している樹種を 4 樹種選び(*Distylium racemosum*, *Quercus salicina*, *Castanopsis sieboldii*, and *Schefflera octophylla*)、各サイトで各樹種につき 5 個体の反復を選んだ(1 サイト当たり合計 20 個体)。これらの個体から、1 個体当たり 3 本の細根を切断しないように注意深く掘り出し、洗浄し、それぞれにシリンジを装着した(1 個体当たり 3 本のシリンジ)。装着したシリンジ内に炭素を含まない栄養液を注入し、シリンジを暗条件で 24 時間放置した。滲出物を含む栄養液を回収し、直ちに現場でメンブレン・フィルターを用い(0.45- μ m sterile syringe filter)濾過し、濾液を冷蔵して京大に持ち帰った。京大の実験室で高速液体クロマトグラフィーにより、含まれる有機酸の定性と定量を行った。また、滲出物中の総炭素量・窒素量を、TOC 測定装置により決定した。さらに、同じ個体の細根から根圏土壌を採集し、3 - 1 と同じ方法で根圏土壌中の非晶質鉱物濃度と土壌リン画分濃度を決定した。

4 . 研究成果

各サイトから採集した土壌を酸性シュウ酸塩により抽出し、抽出されたアルミニウム

(Al_o)と鉄 (Fe_o)の濃度を ICP により決定した。Al_o+1/2Fe_o (mg/g)を非晶質鋳物量の指標として算出した。その結果、表層土壌の Al_o+1/2Fe_o (mg/g)は 2.62(カヤノ平)から 29.69(函南)まで非常に幅広い値を示した。20 サイトのうち、土壌分類基準を越えて (Al_o+1/2Fe_o = 20 mg/g 以上)火山灰土壌と判定されたサイトは 3 サイトであった(神奈川県函南、高知県佐田山、宮崎県霧島)。このことから、日本列島の自然林生態系は火山との距離や噴火後経過年数などに応じて様々に火山灰(テフラ)の影響を受けており、火山灰土壌に成立している森林も存在する。これらの土壌の全リン濃度を決定したところ、やはり大きなサイト間差が見出された。また、非晶質鋳物濃度 (Al_o+1/2Fe_o)は、全リン濃度および可給性リン濃度と有意な正の相関関係を示した。このことから、日本列島の自然林生態系では、テフラ加入によるリン施肥の効果を受けて可給性リンの濃度が維持されていることが示唆された。さらに、パス解析により、非晶質鋳物濃度は、交換態陽イオン濃度や全リン濃度への正の効果を通じて、間接的に窒素動態にも大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

樹木細根から集めた滲出物からは合計 8 種の有機酸が同定された。滲出物の有機酸の組成は、樹木種に依存性があることがわかった。さらに、土壌の非晶質鋳物濃度が高いほど、クエン酸とリンゴ酸の滲出速度が高まることがわかった。1 樹種については、根圏土壌中の非晶質鋳物吸着態のリン濃度が非根圏土壌に比べて大きく低下しており、有機酸滲出による非晶質物質の可溶化の可能性が示唆された。

以上から、テフラの加入が森林生態系にリンを施肥する効果を持ち、樹木がこれを利用することで森林生態系が持続している可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mukai M., Sawada Y., Kitayama K., Aiba S.	4. 巻 24
2. 論文標題 Productivity and morphological traits of fine roots in forest ecosystems along an elevation gradient of Yakushima Island.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 35-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13416979.2018.1555882	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 Mukai M., Mori T., Aiba S., Kitayama K.	4. 巻 35
2. 論文標題 Nitrogen mineralization rates of the soils incubated under different temperatures from different elevations along an environmental gradient on Yakushima Island.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 428-438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/1440-1703.12092	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 -

1. 著者名 Wagai, R, Kajiura, M, Asano, M.	4. 巻 6
2. 論文標題 Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: organo-metallic glue hypothesis.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SOIL	6. 最初と最後の頁 597-627
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/soil-6-597-2020	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Mana Mukai, Tamihisa Ohta, Shin Ki-cheol, Shin-ichiro Aiba, Kanehiro Kitayama
2. 発表標題 Estimating the contribution of volcanic ash as a source of mineral nutrients in forest ecosystems on Yakushima Island using Sr and Pb stable isotopes
3. 学会等名 第66回日本生態学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井真那、相場慎一郎、北山兼弘
2. 発表標題 屋久島火山灰土壌における樹木細根滲出物と根圏土壌の化学特性の変化
3. 学会等名 第130回 日本森林学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井真那・北山兼弘
2. 発表標題 火山灰土壌に生育する樹木はアロフェンに吸着したリンを獲得できているのか？
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山大稀・北山兼弘
2. 発表標題 リン欠乏の熱帯降雨林における、リン供給源としての土壌有機態リンの重要性
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向井真那、佐々木真優、北山兼弘
2. 発表標題 日本の森林生態系における土壌深度別の細根現存量と細根形質の関係
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会、名古屋大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mana Mukai, Mayu Takagi, Kanehiro Kitayama
2. 発表標題 Tree strategies for acquisition of recalcitrant P in volcanic soils: with an emphasis on chemical properties of the rhizosphere of Quercus serrata.
3. 学会等名 第67回日本生態学会大会、名城大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木真優、向井真那、北山兼弘
2. 発表標題 日本列島の自然林における土壌窒素とリンの可給性を決定する要因
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会、名古屋大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木真優、向井真那、北山兼弘
2. 発表標題 日本の森林生態系における土壌窒素純無機化速度に影響を及ぼす要因
3. 学会等名 第67回日本生態学会大会、名城大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木真由、向井真那、北山兼弘
2. 発表標題 森林生態系への火山灰加入の施肥効果：火山灰加入量の異なるコナラ林の比較検証
3. 学会等名 第67回日本生態学会大会、名城大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 真優、向井 真那、北山 兼弘
2. 発表標題 日本の森林生態系における土壌窒素純無機化速度と火山灰加入の関係
3. 学会等名 第68回日本生態学会大会、岡山大学
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水上知佳、澤田佳美、北山兼弘
2. 発表標題 花崗岩土壌上に成立したコナラ林のリン利用特性と土壌フォスファターゼ活性
3. 学会等名 第68回日本生態学会大会、岡山大学
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和穎 朗太・橋本洋平・平館俊太郎・横山大希・北山兼弘
2. 発表標題 キナバル山熱帯林の標高傾度における土壌リンの存在形態：蛇紋岩土壌の特異性
3. 学会等名 日本ペドロロジー学会 2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山兼弘
2. 発表標題 キナバル蛇紋岩生態系における地質-土壌-植生間の相互作用
3. 学会等名 日本ペドロロジー学会 2021年度大会（招待講演）
4. 発表年 2021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	和穎 朗太 (Wagai Rota) (80456748)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環 境変動研究センター・上級研究員 (82111)	

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
---------	---------