

熱帯林土壌の酸性化メカニズムの解明と肥沃度回復技術への応用

藤井 一至 (森林総合研究所 立地環境研究領域)

fkazumichi@affrc.go.jp

酸性雨や農業による土壌酸性化は植物生長を抑制する土壌劣化として問題視されがちだが、森林生態系においては土壌発達、植物への養分供給を促進するプロセスでもある。一見矛盾する土壌酸性化と植物生産性の関係は、酸性化が複数のプロセスの総体であることを反映し、個々のプロセスの大小や植物の適応機構の有無によって肥沃度への影響が異なることを示している。酸生産・消費プロセスの「見える化」によって、農業はどのプロセスを改変し、どのプロセスを制御すれば酸性化を緩和できるかを解析できる。本稿では、熱帯林において明らかになった土壌酸性化メカニズムおよび植物・土壌微生物の適応戦略、焼畑生態系における休閑植生の酸性化緩和メカニズムと肥沃度回復技術への応用例を紹介する。

はじめに

湿潤アジア地域において土壌酸性化は恒常的な問題であり、酸性土壌はしばしば作物生産性や土地利用を制限してきた。特に熱帯地域では、森林の農地転換によって土壌酸性化が加速し、放棄地の増加や森林減少が深刻化している。土壌酸性化の要因は、長期的な風化作用とより短い時間スケールの生物活動、人為影響（酸性雨など）が複合的・連鎖的に関わり合うため、主要因の特定が困難であった。本研究では、生態系内部で発生する酸の生産・消費量を定量評価する手法を確立し、土壌酸性化の主要因を特定するとともに土地利用変化による影響を解析した。

生態系内部で発生する酸による土壌酸性化機構の解明

土壌酸性化は土壌 pH の低下として定義され、生態系外部・内部の酸発生・酸中和プロセス全てを反映する。この中の主要な酸性化要因を特定するために、土壌溶液の陽イオン移動を担う陰イオン種を「深度別」に解析する手法が発達し、酸性雨研究では植物-土壌系のイオン反応に伴うプロトン収支を求めることで土壌の酸中和容量（陽イオン成分の荷電量）の変化を「定量的」に評価できるようになった。本研究ではこの手法を組み合わせ、土壌内部の酸動態を深度別・定量的に評価できる手法を確立した（図 1）。

土壌溶液の下方浸透、植物の樹体・リター生産に伴うイオンフラックスを深度別に定量化し、イオン反応に伴うプロトン生産・消費量を求めた。酸性雨による酸性化解

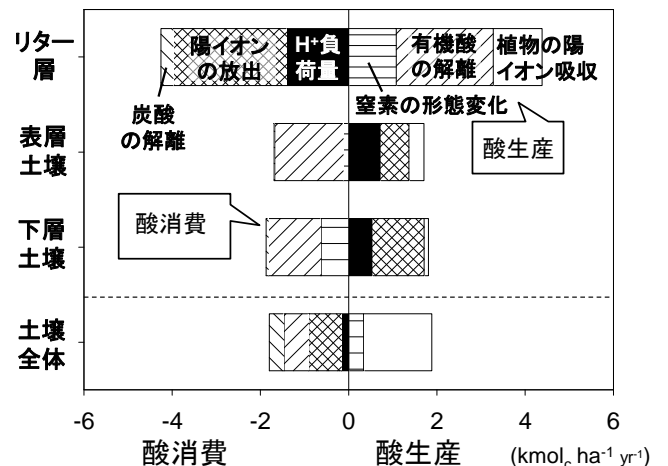


図1 ブナ林土壌における層別別プロトン収支

析では土壤全体のプロトン収支を求めるが、本研究では、土壤層位毎にプロトン収支法を適用する新たな試みによって、生物活動に伴う酸の生産・消費量（炭酸の解離、有機酸の解離、硝酸化成、植物の陽イオン吸収）をプロセス毎に評価することに成功した^{1,2)}。

京都北部ブナ林下のポドゾル性土への観測事例では、生態系外部に由来する酸の影響は小さく、樹木根の陽イオン吸収、微生物による有機酸・硝酸の放出によって表層土壤の酸性化が進む実態を明らかにした。酸の生産・消費に果たす機能は土壤層位によって異なり、植物吸収（根分布）、硝酸イオンや有機酸の生産・消費の時空間的な不均一性が酸性化程度の違い（表層の酸性化）を生じることを解明した¹⁾（図1）。

さらに本手法をインドネシア東カリマンタン州の熱帯林に適用した結果、土壤内部の酸発生量は温帯林よりも高く、高い一次生産量による陽イオン吸収が強風化土壤（全層位にわたる酸性化）の生成を促進している仕組みが裏付けられた。熱帯強風化土壤や欧米の氷河堆積物由来土壤、日本の火山灰土壤の酸性化速度の違いを酸中和容量と酸負荷量によって定量的に説明することが可能となった^{2,3)}。

植物・微生物の強風化土壤環境への適応機構の解明

東南アジアの熱帯林はフタバガキ科樹木、強酸性土壤（Ultisols）の優占という特異性を有し、低い土壤肥沃度（低い交換態塩基・リン濃度）にもかかわらず世界最大級の地上部バイオマスを有する熱帯林が発達する。熱帯林を支える土壤酸性化メカニズムと植物・微生物の適応戦略を解明するため、インドネシア東カリマンタン州の地質条件（酸性度）の異なる熱帯林5地点においてプロトン収支を求めた。

この結果、砂岩由来の強酸性土壤（pH<4.5）では、堆積有機物層から多量の有機酸（溶存有機物）が発生し、泥岩・蛇紋岩由来の弱酸性土壤（pH \geq 4.5）では重炭酸イオンもまた主要な陰イオンとなり、酸性化に寄与する^{2,4)}。これまで微生物分解活性の高い熱帯環境では重炭酸イオンが陽イオン移動を駆動すると考えられてきたが、強酸性土壤では薄い堆積有機物層から多量の有機酸（フルボ酸）が放出されることを新たに発見した^{4,5)}（図2）。いずれの場合も陽イオンの系外への流亡は小さく、樹木・微生物が重炭酸・有機酸を介して養分供給を促進する酸性化機構が存在することを解明した⁶⁾。

炭素インプット量に対する
溶存有機炭素の生産割合（%）

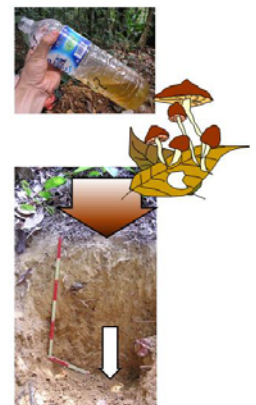
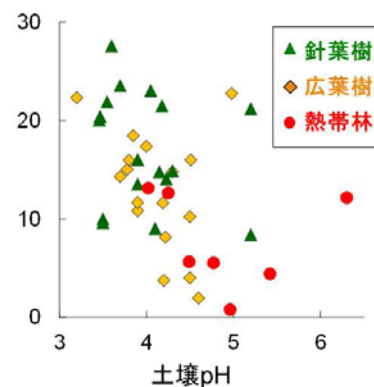


図2 酸性土壤で促進される溶存有機物の生産

一般に酸性条件では植物根・微生物の活性は低下するが、(1) 特定の樹木はリン欠乏に対して根から低分子有機酸（クエン酸、リンゴ酸）放出量を高めて土壤中の難溶性リンの可溶化を促進すること⁷⁾、(2) 糸状菌が酸性土壤で特異的にリター中の難分解性リグニンの分解を促進する酵素（ペルオキシダーゼ）を放出し、有機物・無機養分の可溶化を促進することを現場条件で解明した⁸⁾。本成果は、単純な土壤劣化と見

なされがちな土壤酸性化に植物・微生物による岩石圏からの養分獲得戦略としての生態学的な意義を与えるとともに、熱帯林や酸性土壤に適応したユニークな植物種・菌類と物質循環機能の存在が高いバイオマス生産を支えていることを解明した⁹⁾。

熱帯林の耕地化に伴う土壤酸性化および肥沃度低下・維持機構の解明

熱帯林の耕地化拡大は土壤の有機物減耗と酸性化を加速しており、影響は作物生産性の低下として顕在化している³⁾。熱帯林の耕地転換後の土壤では硝酸化成による酸生産プロセスが活発化することは知られてきたが、耕地化の土壤酸性化速度への影響を解析するためには、酸生産だけでなく消費プロセス（特に、有機陰イオンの無機化）も含めた包括的なプロトン収支解析を行う必要がある。そこで、耕地化後の有機物減耗に伴う酸の生産・消費量を推定できるプロトン収支法を新たに開発し、タイ北部・チェンライ県の熱帯焼畑生態系を事例に適用した¹⁰⁾（図3）。

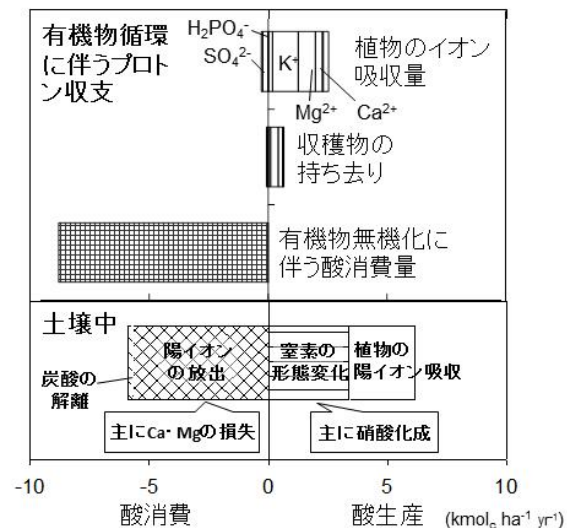


図3 耕地化に伴う酸生産・消費バランス

森林の耕地転換後3年目の観測事例では、硝酸化成の増加や収穫物の系外への持ち去りが土壤への酸負荷量を増加させる一方で、土壤有機物の無機化（減耗）による酸消費量もまた耕地化によって増加し、耕地化初期段階の酸発生に伴う土壤pH低下を緩衝することを発見した¹⁰⁾。ただし、土壤有機物の無機化による酸中和効果は、過去の森林休閑期に蓄積した有機物量に制限される。休閑期間の短縮あるいは連続耕作による土壤有機物の減耗は、酸性化緩和機能も急速に低下させるといふ熱帯耕地土壤に特有な肥沃度低下機構が明らかになった。逆に、伝統的な焼畑システムにおける休閑期間の土壤有機物量の回復には、耕地化に伴う土壤酸性化を緩和する意義もあることが示された。本成果は、耕地土壤の鉍質成分の酸中和容量だけでなく、無機化する土壤有機物の量・質によっても異なることを意味し、土壤有機物量の回復効果の高い休閑植生の導入は、酸性化緩和技術の開発に向けた突破口となると期待できる。

今後の展望

生態系の一次生産は水と土壤養分という、しばしば両立しない要因に規定されている。一次生産の高い熱帯湿潤環境において土壤酸性化は、いわば宿命である。酸性化は、酸性雨や窒素肥料などの単一因子による土壤劣化という単純な構造ではなく、大工原・大杉論争が示すように土壤そのものの変化を含む複雑な現象である。土壤酸性化は人間を含む生物の養分獲得の原則を反映しており、農学において普遍的な課題であり続けるだろう。

土壤の酸性化は、その緩衝能ゆえに短期的にはpHの変化として顕在化しにくい。裏を返せば、一旦酸性になった場合には中和が難しいということの意味する。プロトン収支法は、pHの低下として顕在化する前段階の短期的な酸性化要因でさえも特定でき

る有効なツールであり、酸性化緩和技術の有効性の検証にも活用できる。投入できる中和資材（石灰、堆肥）が限られる環境でも土壤酸性化を緩和する手段を開発することを目的に、東北タイでは斜面下部へ配置した果樹林による養分回収および酸性化緩和機能を実証した¹¹⁾。さらに、インドネシアでは土壤有機物量の維持によって収穫量（あるいは収益）維持と酸性化緩和を両立できる土地管理技術の開発を進めており、有用樹種（香木）の植林、チガヤ草原の短期休閑によって土壤有機物を蓄積し、土壤酸性化を緩和する土地利用技術の開発および実証試験が進行している。

謝辞

本受賞にあたって、国立研究開発法人森林総合研究所からの推薦をいただきました。沢田治雄理事長をはじめ、高橋正通企画部長、三浦覚領域長および職員の皆様に深く感謝申し上げます。京都大学の恩師である小崎隆教授（現首都大学東京）、舟川晋也教授には研究の楽しさを教えていただき、久馬一剛名誉教授、Darwin Anderson 先生（Saskatchewan Univ.）には公私にわたり激励いただきました。共同研究者の Arief Hartono 氏（IPB）、Sukartiningsih 氏（Mulawarman Univ.）、Warsudi 氏、早川智恵氏（東京大学）に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) Fujii K et al. (2008) Contribution of different proton sources to pedogenetic soil acidification in forested ecosystems in Japan. *Geoderma*, 144, 478-490.
- 2) Fujii K et al. (2010) Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia. *Geoderma*, 160, 311-323.
- 3) Fujii K et al. (2011) Soil acidification: natural process and human impacts. *Pedologist* 55, 63-76.
- 4) Fujii K et al. (2011) Fluxes of dissolved organic carbon in tropical forests developed on serpentine and mudstone. *Geoderma*, 163, 119-126.
- 5) Fujii K et al. (2009) Fluxes of dissolved organic carbon in two tropical forest ecosystems of East Kalimantan, Indonesia. *Geoderma*, 152, 127-136.
- 6) Fujii K (2014) Soil acidification and adaptations of plants and microorganisms in Bornean tropical forests. *Ecological Research*, 29, 371-381. 【Suzuki Award Paper】
- 7) Aoki M, Fujii K et al. (2012) Environmental control of root exudation of low-molecular-weight organic acids in tropical rainforests. *Ecosystems*, 15, pp 1194-1203.
- 8) Fujii K et al. (2012) Environmental control of lignin peroxidase, manganese peroxidase, and laccase activities in forest floor layers in humid Asia. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 109-115.
- 9) 藤井一至 (2015) 大地の五億年～せめぎ合う土と生き物たち～, 山と溪谷社, 236pp
- 10) Fujii K et al. (2009) Quantification of proton budgets in soils of cropland and adjacent forest in Thailand and Indonesia. *Plant Soil*, 316, 241-255.
- 11) Fujii K et al. (2017) Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand. *Soil and Tillage Research*, 165, 80-87.