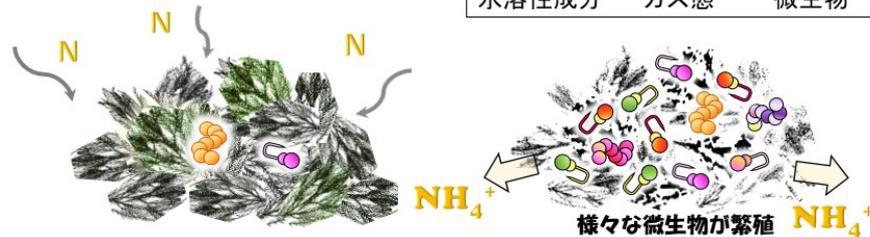
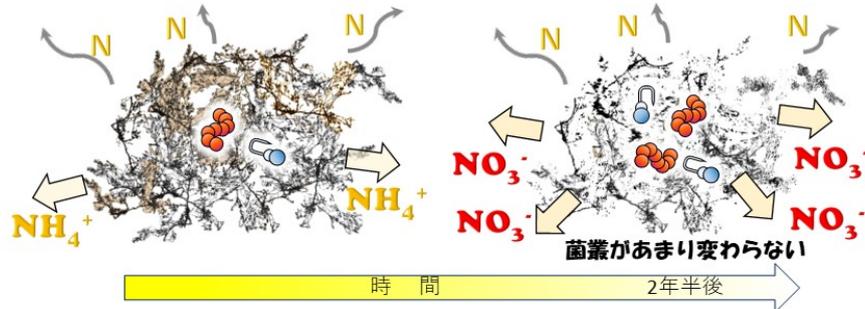


「落ち葉」は大気窒素の吸収剤であり、ゆりかごのように微生物を包み込んでおくむ。



「落ち根」は窒素の放出剤であり、その役割は肥料のようである。



落ち葉は“ゆりかご”のように微生物を包み込んでおくむ、 細根は“肥料”として土壤に還る？ —森を支えるそれぞれのやり方—

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院生命農学研究科の谷川 東子 准教授、同大学院環境学研究科の平野 恭弘 准教授は、三重大学大学院の松田 陽介 教授、北里大学の眞家 永光 准教授、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所の藤井 佐織 主任研究員らとともに、本邦人工林の 7 割を占めるスギ・ヒノキの 2 樹種について、それらの葉と細根が枯れて土に還ったときに、土壤生態系で果たす役割が極めて対照的であることを明らかにしました。

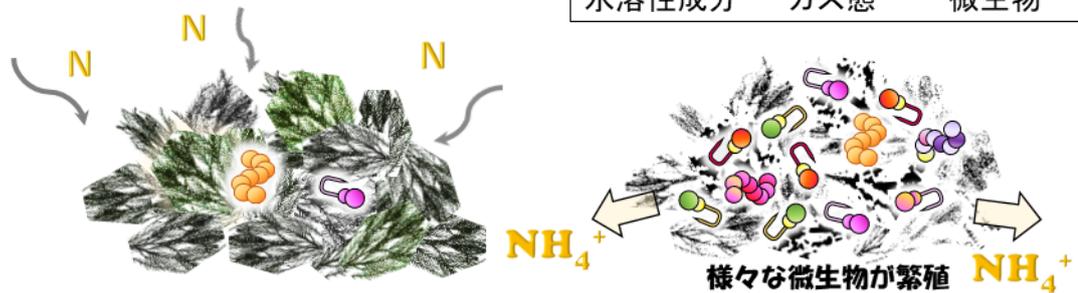
森林生態系の地下部には、有機物を分解して物質循環を駆動する微生物が棲んでいます。また環境変動に対応し、樹木は細根量を変化させることがあります。そこで細根が土に還る際の物質循環における役割は「落ち葉」と同じかという知見は、環境変動がどのように物質循環を変化させるかを精査するために必要です。本研究では、葉と細根の分解の仕方を調べ、前者は体の半分以上が分解して失われる頃まで、内在する微生物の助けを借りて窒素（微生物が体を作る際に必要な成分）を大気から取り込み「ゆりかごのように種類多くの微生物を包み込んで繁殖させる」のに対し、後者は分解中、常に窒素を放出し「肥料として機能する」という対照的な役割があることを明らかにしました。

本研究は、森林生態系における窒素循環や炭素循環の理解に役立ちます。

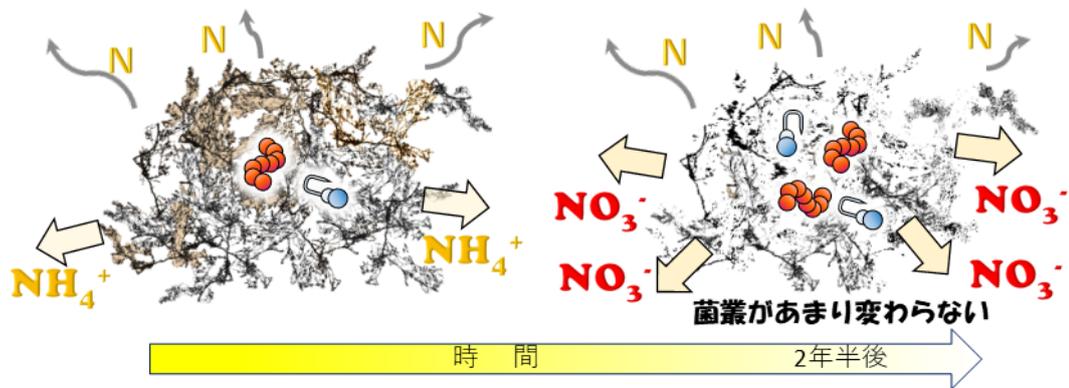
本研究成果は、2022 年 9 月 15 日付オランダの出版社 Elsevier 社の国際学術誌「Science of the Total Environment」にてオンライン掲載されました。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究（B）『人工林土壌の塩基を枯渇させない方法の模索』および『気候と土壌酸性度の 2 勾配に対する根圏コンソーシアム応答の解明』の支援のもとで行われたものです。

「落ち葉」は大気窒素の吸収剤であり、ゆりかごのように微生物を包み込んでくむ。



「落ち根」は窒素の放出剤であり、その役割は肥料のようである。



【研究背景と内容】

(1) 研究の背景

樹木の体を構成する葉や細根は、生まれてから死ぬまでの時間が短いため、毎年多量に土壤に還ります。これらの植物の落とし物は、土壤に生息する微生物の餌となります。微生物が「落ち葉」や「落ち根」^{注1)}を分解する過程で様々な物質が土壤に放出されますが、分解研究の多くは「落ち葉」に集中し、「落ち根」については研究史が浅く、不明な点が多く残されています。そこで私たちは「「落ち根」の中ではぐくまれる微生物たちの種類は「落ち葉」のそれと同じなのか」に着目しました。これらの情報は、森林生態系の「生産（光合成）系」機能と双璧をなす「分解系」機能を正しく理解するために必要です。

(2) 調査方法

「スギ・ヒノキの葉と細根をカラムに詰め（図1）、加温により分解を促進しながら定期的に人工的な雨を降らせ、溶出してきた液を集める」という実験（図2）を、2年半にわたって実施し、葉と細根の分解に関わる菌叢や分解に伴う窒素の放出パターンを調べました。今回、窒素に着目した理由は、微生物の繁殖時に必須の成分であり、森林生態系における生産機能の律速要因でもあることから、上述の疑問に深くかかわると考えられたためです。

(3) 研究成果

① [落ち葉は窒素の吸収剤、落ち根は窒素の放出剤]

スギ・ヒノキの葉は速く分解しながらも、その過程で窒素を大気から取り込み（おそらく窒素固定菌の増殖に適している^{注2)}ため）、体の半分以上が分解して消滅する頃まで窒素量を増やしたのに対し、細根は、ゆっくりと体を分解させ、ほぼ途切れることなく窒素を雨に溶かして周囲に放出する特性を持つことが明らかになりました（図3,4）。

② [落ち葉はゆりかご・落ち根は肥料として機能]

窒素の動きと連動し、葉では微生物が多く養われて爆発的に増え、種類も変化していく「菌叢遷移」が認められるのに対し、細根では微生物活性も菌叢遷移の程度も葉に劣ることがわかりました（図5）。つまり、「落ち葉」はゆりかごのように微生物を包み込んでおくみ、「落ち根」は肥料のように、包み込むというよりは周囲に窒素を供給するという、それぞれ別の方法で、地下からスギ・ヒノキの森を支えていると考えられます。

③ [落ち葉と落ち根を好む微生物は同じではない]

実験を通じて、「葉と細根を食べて育つ微生物は、時間と共に“より似なくなっていく”」こともわかりました（図5）。土壌酸性化のような環境変動に反応して、植物は細根を増やすことがあります。細根が増加し、それが枯れて土壌に還る量が相対的に多い森は、増加しない森に比べ、物質循環の経路や速度が変化する可能性があります。

④ [落ち根は硝酸イオンを放出する]

細根の分解後期では、硝酸イオン形態の窒素（硝酸態窒素）が多量に放出されることがわかりました（図4）。硝酸イオンは土壌が捕まえにくい形態（雨で流されて土壌から失われやすい形態）なので、環境変動による細根の増加、ひいては「落ち根」増加は、森林生態系からの窒素流亡の機会を増やすポテンシャルがあることに、注意が必要です。

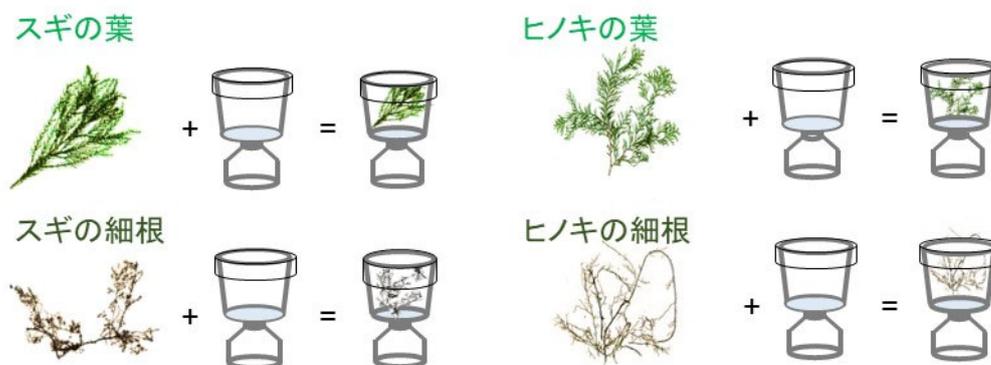


図1 培養カラムの作成
葉と細根を別のカラムに入れて分解実験を行いました。

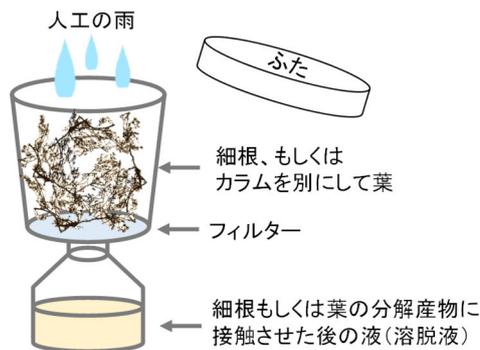


図2 人工雨をカラムに降らせて溶脱液を採取する様子
定期的な雨を降らせて、葉や細根を通過した液(溶脱液)を下のボトルで回収し、分析しました。

> 1は窒素が増える、< 1は窒素が減ることを示す

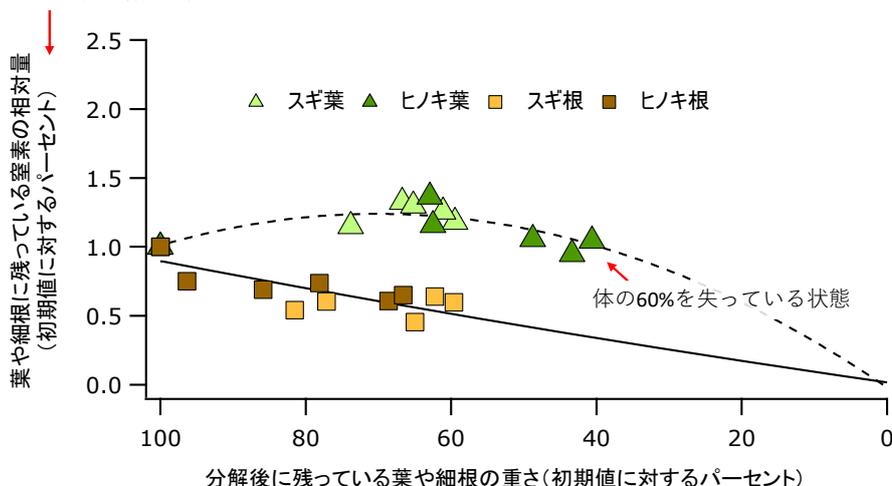


図3 分解中みられる、葉や細根の重さ(徐々に減る)と残っている窒素量の関係

葉は体の半分以上(重さにして60%程度)が分解で失われる頃までは、1以上を維持する、つまり窒素を増やしています。

これは、葉がはぐくむ窒素固定菌の働きによる現象とみられます。

一方、細根は、分解に伴い徐々に窒素を失いました。このことは、根は分解過程で、窒素を雨に溶かして周囲にばらまき(他に、大気にガスとして放出する経路もあります)を意味しています。

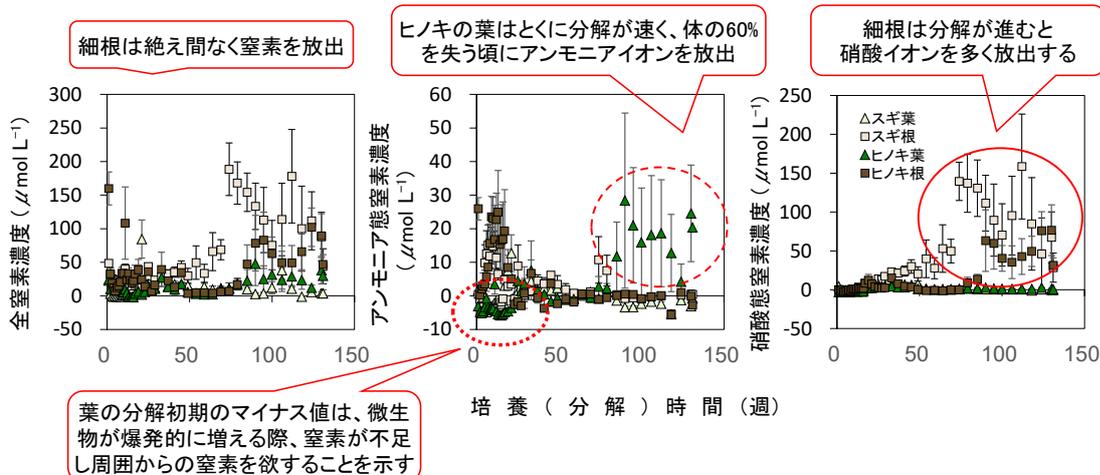


図4 スギ・ヒノキの葉と細根の分解中に得られる溶脱液中の窒素濃度(雨に溶けて流れる窒素の量を示します)

各種濃度から、人工雨で添加した窒素濃度は差し引かれているため、人工雨の窒素がカラムから溶脱せずに微生物に使われる量が多い際には、濃度はマイナスの値をとります。つまり、プラスの値はカラム中で葉や細根がはぐくむ小さな生態系からの「窒素放出」を、マイナスの値は「窒素吸収」を示しています。

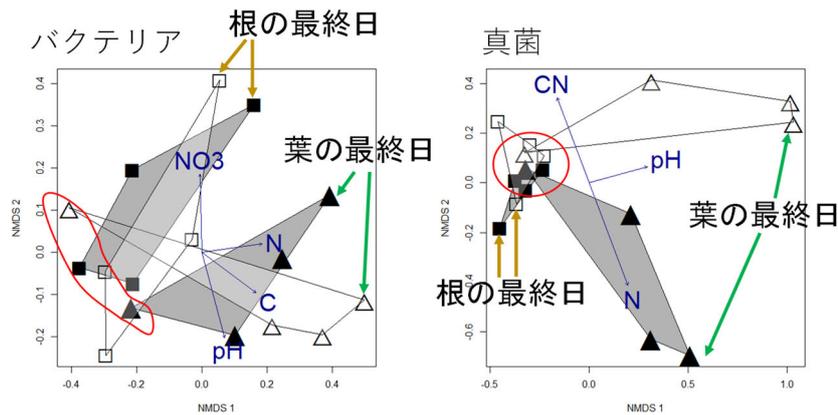


図5 スギ・ヒノキの葉と細根の分解中に見られる菌叢遷移(近くに位置する点は、微生物のメンバー構成が似ていることを示しています)

△スギ葉; ▲ヒノキ葉; □スギ根 ■ヒノキ根。最終日とは、分解実験の最終日を示します。

- 赤丸で囲った点は、分解前を示します。点が近くに位置していることから、スギ・ヒノキの葉も細根も、分解前はメンバー構成が似ていることがわかります。
- しかし、分解が進むにつれて点の位置が移動しました。バクテリアの場合、葉は左の方向へ、細根は左上方向へ離れていきました。これは葉と根がはぐくむバクテリアのメンバー構成は、“だんだん似なくなっていく”ことを意味します。真菌の場合は、葉は左の方向に大きく動きますが、細根はほとんど動きませんでした。これは、葉では菌叢遷移(メンバーチェンジ)が進むが、細根ではその程度が低いこと、また、やはり葉と細根ではメンバー構成が“似なくなること”を意味しています。

【成果の意義】

本研究は、「落ち根」が微生物をはぐくむ役割は、「落ち葉」と大きく相違することを明らかにしました。環境変動が著しい現在、植物は「葉や細根」を「生産・枯死」させる「量」を変化させたり、ピークの季節をずらしたりという反応をする可能性があります。通常より「落ち葉量」に対する「落ち根量」が高くなると、森林生態系における窒素の支出が増える可能性があること、土壌微生物の活性やメンバー構成が変化する可能性があることが新しく示されました。

この研究は室内で行われたもので、本研究の結果が直ちに野外に適応できるかどうかは不明です。野外では、室内カラム実験ではなかった“気候の変化”や“新しい「落ち葉」「落ち根」さらには「落ち枝」などの別の植物器官からの窒素供給”があります。また、菌叢遷移(微生物のメンバーチェンジ状況)を確認するために、「カラム内と外界との微生物出入りは、大気や人工雨を通してのみ」という環境を作り出しましたが、野外ではもっと自由に微生物が往来し、それに伴い窒素の動きも激しくなります。こういった変化は、本研究の結果を左右する可能性があります。しかし本研究のような、変化のない平坦な環境でなければ、知り得ないことが自然界にあることも事実です。室内実験での発見を野外で検証していくステップを積み重ねることで、窒素循環、ひいては炭素循環の変動を精度よく予測することが、可能になると考えられます。

【用語説明】

注 1) 落ち根 :

落葉期になると、葉が持つ養分の一部が樹木本体に引き戻され、葉の葉柄部分には樹体と切り離す離層という組織が形成される。このようにして落ちた葉のことを「落ち葉」と学術的には呼ぶ。一方、細根に関しては、養分の引き戻しや離層形成について不明な点が多いため、「落ち根」と一律には表現しがたい面もあるが、ここではわかりやすく、枯れて土に還る根のことを「落ち根」と呼ぶ。

注 2) 窒素固定菌の増殖に適している :

森林総合研究所の山中高史博士・平井敬三博士らは、スギの葉の分解過程で特異的に窒素固定細菌が増殖することを示した (Yamanaka et al. 2011, Journal of Forest Research; 平井ら. 2011, 森林立地)。

【論文情報】

掲載紙: Science of the Total Environment

論文タイトル: Contrasting patterns of nitrogen release from fine roots and leaves driven by microbial communities during decomposition (分解中の微生物群集が駆動する細根と葉からの窒素放出の対照的なパターン)

著者: Toko Tanikawa^{a,b}, Nagamitsu Maie^c, Saori Fujii^d, Lijuan Sun^e, Yasuhiro Hirano^f, Takeo Mizoguchi^b, Yosuke Matsuda^g

(谷川東子^{a,b}, 眞家永光^c, 藤井佐織^d, Lijuan Sun^e, 平野恭弘^f, 溝口岳男^b, 松田陽介^g)

a, 名古屋大学大学院生命農学研究科; b, 国立研究開発法人森林総合研究所関西支所; c, 北里大学獣医学部; d, 国立研究開発法人森林総合研究所; e, 蘭州大学(中国); f, 名古屋大学大学院環境学研究科; g, 三重大学大学院生物資源研究科

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158809

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158809>