

題目：Nitrogen cycling driven by soil microbial communities in exotic black locust plantations and native oak forests in the drylands of East Asia

(東アジア乾燥地の外来種ニセアカシア植林地および在来種ナラ林における土壤微生物が駆動する窒素循環)

要約：

窒素 (N) は乾燥地生態系において、水と共に植物成長の制限要因となる主要な資源であり、植物は土壤微生物の働きを介して窒素を獲得する。植物にとって可給態の N は土壤微生物による分解作用によって生成され、また、植物は菌根菌と共生することによっても N を吸収する。そのため、環境変動に対する窒素循環の応答メカニズムの理解のためには、土壤微生物の動態の理解が不可欠である。東アジアに位置する中国黄土高原の乾燥地域では、気候変動による降水パターン変動に伴って、乾燥度が上昇することが今後予想されている。また、本地域はこれまで大規模な土地利用の変化を経験しており、もともとの在来種リョウトウナラはほとんど伐採され、代わりに外来種ニセアカシアが多数植林されている。これらの気候・土地利用の変化は、土壤微生物群集およびそれらが駆動する土壤中の N 循環に大きな影響を与えると考えられた。さらに、本地域のニセアカシア林では、リョウトウナラ林へと自然に遷移していく様子も見られていない。土壤中の可給態 N の量や菌根菌源の違いが樹木の N 利用特性に影響を与えることから、ニセアカシア林とリョウトウナラ林で土壤微生物・N 循環が異なれば、樹木の N 利用特性も異なると考えられ、それがニセアカシア林でリョウトウナラ実生が生育しづらい要因の一つになっている可能性も考えられる。

本研究では、第二章で気候変動（乾燥度の上昇）が、第三章で土地利用の変化（外来種の植林）が土壤の微生物群集および N 循環に与える影響について明らかにすることとした。さらに、第四章では、林冠木の変化させた土壤微生物群集および N 循環が、下層木の N 利用特性に与える影響について解明することとした。そのために、第二・三章では土壤 DNA から微生物の量・群集組成・機能を分析し、また、土壤物理化学性および土壤中の各形態 N の現存量などを測定して、環境要因が微生物群集の改変を通して土壤 N 循環にどのような影響を与えたのか明らかにした。土壤 N 循環を理解するにあたって、土壤 N 形態変化過程を、真菌が駆動する分解過程（高分子有機化合物を低分子有機化合物へと分解する過程）、原核生物が駆動する無機化過程（比較的 low molecular weight 有機化合物をアンモニウム態へと無機化する過程）、そしてアンモニア酸化細菌・古細菌が駆動する硝化過程（アンモニウム態 N が亜硝酸態 N を経て、硝酸態 N へと硝化される過程で、アンモニア酸化の過程が律速となりやすい）へと分けて議論することとした。さらに第四章では、土壤中の各

形態 N および植物体の N 安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) を測定し、また根に共生する菌根菌の DNA を分析して、ニセアカシア林とリュウトウナラ林では樹木の N 利用特性、特に菌根菌との共生関係や利用する N 源が、どのように異なるのか明らかにした。

第二章では、乾燥度の上昇が土壤微生物・N 循環に与える影響を理解するために、乾燥傾度に沿った 3 つのニセアカシア林の比較を行うこととした。長期乾燥条件下では、水よりも N の方が植物の生産性の制限要因になるにも関わらず、乾燥度の上昇が N 循環に与える影響のメカニズムについては未だよくわかっていないため、本研究では各 N 形態変化過程を駆動する微生物の動態を詳細に解明することとした。結果から、乾燥傾度に沿って全ての N 形態変化過程が制限を受けることが明らかとなった。分解・無機化過程は、乾燥傾度と共に基質の量や質が低下することで、腐生菌の量が減少し、有機態 N 分解に関与する原核生物の組成が変化したために、制限を受けたことが明らかとなった。一方で、硝化過程は、乾燥傾度に伴う土壤含水率の低下に伴いアンモニア酸化細菌が減少することによって、制限を受けたことが明らかとなった。このことから、乾燥度の上昇が今後起これば、含水率の低下を介して、まず硝化過程が影響を受け、硝酸態 N の生成が減少すると考えられる。この硝酸態 N の減少は、樹木の N 吸収や生産性にも影響を与え、腐生菌や原核生物の制限要因となっている有機物の供給量にも影響が及ぶかもしれない。このように、乾燥度の上昇は硝化過程をきっかけとして、生態系内部の N 循環全体を遅くする可能性があることが示唆された。

第三章では、リュウトウナラ林からニセアカシア植林地への転換が土壤微生物・N 循環に与える影響を理解するために、ニセアカシア林とリュウトウナラ林を比較することとした。本調査地において、ニセアカシアが積極的に N 固定を行っている可能性は低く、本研究では、ニセアカシアとリュウトウナラでは共生する菌根菌タイプが異なる（ニセアカシアはアーバスキュラー菌根 (AM) 菌共生、リュウトウナラは外生菌根 (ECM) 菌共生である）ことに注目した。ECM 菌は有機態 N を分解する細胞外酵素を生成する能力が高く、分解により放出された N を吸収するため、ECM 菌共生種優占林では、非共生微生物の利用可能な N が減少し、分解が抑えられると考えられている。一方で、AM 菌は細胞外酵素を生成する能力が低く、非共生微生物の分解過程を制限しないと考えられている。しかし、ECM 菌がどの非共生微生物とどの形態の N の獲得競争をしているかについてはまだ不明であるため、本研究では土壤微生物・N 循環を詳細に解明することで、これを明らかにすることとした。さらに、AM 菌共生種優占林と ECM 菌共生種優占林では、菌根菌タイプ以外にも土壤物理化学性も大きく変化するため、本研究では土壤物理化学性をより大きく変化させる乾燥傾度に沿って二つの林分を比較することで、要因を分離して菌根菌タイプによる影響を理解することとした。結果から、リュウトウナラ林では、腐生菌や有機態 N 分解を行う原核生物はニセアカシア林よりもむしろ多かったのに対し、アンモニア酸化微生物は常にニセアカシア林よりも少なかった。それと一致して、硝酸態 N の量もリュウトウナラ林では著しく少なかった。このことか

ら、リョウトウナラ林では、ECM 菌がアンモニア酸化微生物と N 獲得競争を行い、硝化過程を制限する一方で、ニセアカシア林ではアンモニア酸化微生物の働きによって硝酸態 N の現存量が高くなることが明らかとなった。このように、土地利用の変化は、N 循環（特に硝化過程）を大きく変化させることが明らかとなった。

第四章では、林冠木の違いが下層木の N 利用特性に影響を与えるのか理解するために、ニセアカシア林とリョウトウナラ林で同種の下層木を対象に研究を行った。結果から、ニセアカシア林の下層木は、葉と根の $\delta^{15}\text{N}$ の値が土壌中の硝酸態 N の $\delta^{15}\text{N}$ の値に近く、硝酸態 N を主に利用していると考えられた。一方で、リョウトウナラ林の下層木は、根の $\delta^{15}\text{N}$ が葉の $\delta^{15}\text{N}$ より高く、菌根菌に依存して N を吸収していることが示唆された。この結果は、植物にとって吸収しやすい硝酸態 N の現存量がニセアカシア林では高く、リョウトウナラ林では非常に低くなっているという第三章の結果とも一致している。また、ニセアカシア林とリョウトウナラ林では、同種の樹木でも根の菌根菌群集が異なり、それぞれ林冠木の菌根菌群集と似ていた。このことから、林冠木が変化させた土壌の微生物菌群集および N 循環が、下層木の N 利用特性に大きな影響を与えることが示唆された。

本研究から、黄土高原の乾燥地域における降水パターンの変動およびニセアカシアの植林は、土壌微生物菌群集と N 循環を大きく改変し、またそれらの変化は下層木の N 利用特性にも影響を与えることが示唆された。第二・三章の結果から、含水率の変化に敏感な硝酸態 N に頼るニセアカシア林の下層木よりも、菌根菌に N 獲得を頼るリョウトウナラ林の下層木の方が、気候変動に対して安定的であると考えられた。また、第三・四章の結果から、リョウトウナラ林では下層木が菌根菌に N 獲得を依存するため、植物による菌根菌を介した土壌への C 投資が増え、土壌 C 蓄積量が高くなると考えられる。このようにニセアカシア林とリョウトウナラ林の N 循環の違いは、森林の気候変動に対する安定性や C 蓄積など森林の別の機能へも影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、ニセアカシア林とリョウトウナラ林では下層木の N 利用特性だけでなく、葉の N 濃度も異なっていたことから、樹木同士の資源競争関係が林分間では異なっている可能性がある。また、ニセアカシア林においても、リョウトウナラ林の土壌と共にリョウトウナラを育てると、ECM 化率・葉 N 濃度・生存率が上昇することも追加実験により明らかとなった。このように、ニセアカシア林の土壌微生物・N 循環がリョウトウナラ林と異なることが、ニセアカシア林でリョウトウナラ実生の生育しない原因の一つになっている可能性が示唆された。本地域では、ニセアカシアだけでなく、在来種かつ ECM 菌共生種であるマツやポプラも植林木として利用されており、マツ・ポプラとリョウトウナラとの混交林はこの地域でもよく見られる。さらに、マツ林とリョウトウナラ林の抽出態 N の組成は非常によく似ていた。本研究から、ニセアカシアではなく、在来の ECM 菌共生樹種の植林によって、リョウトウナラ林と近い生態系機能を持つ森林が成立し、リョウトウナラ林への自然遷移も見込まれるのではないかと考えられた。