

学 位 論 文 題 名

積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態と 地表処理の及ぼす影響

学位論文内容の要旨

窒素は、全ての生物にとって必須養分である一方、過剰である場合は流域の富栄養化を招いたり、人体へ悪影響を及ぼしたりするなどの問題も存在している。森林生態系においては、近年、人間活動の活発化に伴う大気からの窒素沈着の増加や、森林施業による窒素循環過程の攪乱などが問題となっており、多様な環境下での窒素循環過程を解明することが必要とされている。森林生態系内における窒素生成・消費プロセスの多くは、根圏土壌－植生系において生じており、土壌内での窒素動態を明らかにすることが重要である。無機態窒素は植物が利用しやすい窒素であり、その一つである NO_3^- は土壌に吸着されづらく水に伴って移動しやすいという性質を持つ。そのため、季節的な降水パターンは系からの NO_3^- 流出に影響を及ぼし、特に植生の吸収が少ない季節には降雨や融雪などの水移動が根圏からの NO_3^- 流出に影響する。季節的に積雪のある地域では、冬期間中の降水が融雪期に集中して土壌に供給されるという特性を持っているため、融雪期には土壌や渓流水中の NO_3^- 濃度が大きく変動するものと考えられる。また、森林破壊や地表の攪乱は、土壌中の窒素動態をも変化させ、融雪期には多量の窒素が流出する可能性が想定される。本研究は、とくに積雪・融雪イベントの影響に着目し、森林施業による攪乱の典型的な例として林床植生や表層土壌の除去による樹木の更新補助作業（掻き起こし）の観測を含めて、積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態を解明することを目的とした。

1. 積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の無機窒素動態を評価するため、降雨（雪）および土壌溶液を通年にわたって採取・分析を行い、土壌系の窒素濃度や収支の季節変動を求めた。また、植生の窒素蓄積および還元量の観測も行った。土壌溶液の NO_3^- 濃度変動から、夏期における NO_3^- は降雨の少ない時期に表層土壌で生成され、強い降雨によって下層へと移動することが把握された。融雪期における NO_3^- ピーク濃度はインプットである積雪の濃度よりも低く、このことは、土壌へ供給された窒素が土壌内の微生物などに取り込まれたことを示している。土壌系の窒素収支からも、外部から土壌に供給された窒素量に対して、土壌からの溶脱量は約 30% に過ぎず、その大部分は生態系内に保持されていたことが明らかであった。これは、系外から供給された窒素が森林の植生や微生物の養分として利用されたためと考えられる。また、リターフォールとして植生から土壌へ還元される窒素量や樹木への窒素蓄積量は、系外からの窒素供給量や土壌からの窒素溶脱量に比べて非常に大きかった。このことは、生態系の内部循環による窒素移動量が非常に大きいということであり、大気からの窒素を少しずつ保持しながら、生態系内には大量の窒素プールや循環量が維持されていることを示している。融雪期間における土壌からの窒素溶脱量は、年間溶脱量の 60% 以上に相当していた。生物活動が活発な夏期に比べ、気温の低い厳冬期から融雪期にかけては土壌微

生物や植生による窒素利用が少なく、積雪や表層土壌に蓄積されていた窒素は、多量の融雪水とともに下層へと溶脱していることが明らかとなった。

2. 掻き起こし処理が森林生態系における土壌中の無機態窒素動態に及ぼす影響、およびそれらに対する融雪イベントの寄与について明らかにするため、林地に掻き起こし処理区と無処理の対照区を設け、降水および土壌溶液の窒素濃度を経時的に調査した。掻き起こし処理区では、土壌溶液中の NO_3^- 濃度が対照区のおよそ 80 倍まで上昇していた。掻き起こしによる植生の窒素吸収減少が強く影響していると考えられた。また、深度 10cm における地温は処理区で有意に高まっており、植被除去に伴う地温上昇が土壌微生物による硝化を促進させ、処理区土壌で NO_3^- 濃度を上昇させたと考えられた。季節変動をみると、土壌 NO_3^- 濃度のピークは深度 10cm では夏期に、深度 40cm では秋期にあらわれた。また、融雪後期には両深度ともに年間を通じて最も低い値を示した。これらのことから、気温の高い夏期には、掻き起こし処理区の土壌表層部での盛んな硝化活動によって NO_3^- が生成され、植生の NO_3^- 吸収がないために、表層土壌の NO_3^- は降雨に伴い下層へと移動したと考えられる。冬期は水移動量が小さいため、生成された NO_3^- は下層土壌に留まり比較的高い濃度で推移するものの、融雪期には NO_3^- 濃度の低い融雪水が多量に土壌へ供給されることで、土壌溶液濃度が希釈されるものと考えられた。掻き起こし処理区の窒素収支を見ると、深度 40cm の土壌からは年間で $3.6 \text{ gN m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の NO_3^- が流出しており、対照区の $0.05 \text{ gN m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と比べ非常に大きい流出量を示していた。また、融雪期には年間溶脱量の約 54% に相当する NO_3^- が土壌から系外に流出していた。さらに、掻き起こし処理区では硝化作用に伴う酸の生成が、土壌から塩基性カチオンを交換溶出させていた。掻き起こしによる土壌窒素環境の変化は、他の栄養塩の存在形態にも影響を及ぼしており、処理区土壌からは多量の NO_3^- やカチオンが系外へ流出することが明らかとなった。

3. 掻き起こし処理が土壌の無機態窒素動態に与える影響の経年的な変化過程を評価するため、処理区土壌の溶存無機態窒素現存量、微生物バイオマス炭素現存量および植生への窒素蓄積量の経年変化を調べた。また、処理後 1 年および 5 年目の土壌の窒素無機化特性を調査し、それらの結果から、土壌 NO_3^- 濃度上昇が引き起こされるメカニズムと、その後の窒素動態変化について考察した。掻き起こし処理区における土壌 NO_3^- 現存量は、処理後 3 年目まで対照区に比べ有意に高く、その後は徐々に減少する傾向にあった。また、処理後 1 年目の土壌では低温下でも正味硝化が起こっており、積雪下の土壌で生成された NO_3^- が融雪期には土壌から流出している可能性があった。掻き起こし処理後 3 年目まで土壌 NO_3^- 現存量が高い状態で推移していたことには、処理による植生の窒素吸収減少だけでなく、土壌の正味硝化速度の増加も影響していた。表土除去に伴う土壌有機物の減少が土壌微生物に対する炭素基質不足を招き、結果として無機態窒素の有機化減少による正味硝化速度の増加を引き起こし、土壌 NO_3^- 現存量が増加したと考えられた。掻き起こし処理からの年数経過に伴う土壌 NO_3^- 現存量の減少に関しては、処理後 2-3 年目までは降雨や融雪による土壌からの NO_3^- 溶脱が主な要因であり、処理後 4 年目以降は回復した植生への窒素蓄積が主な要因であった。また、掻き起こし処理後 5 年が経過した土壌においても、処理後 1 年目の土壌と同様に、正味硝化速度は高く、炭素および窒素基質の不足が窒素無機化に影響していたことから、森林の土壌窒素動態において掻き起こし処理の影響は数年間持続することが明らかとなった。積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態では、表層土壌が持つ窒素保持や土壌微生物への養分供給という機能が重要な役割を果たしており、表層土壌の攪乱を抑えその機能を維持することが、年間を通じた土壌系での窒素保持につながることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	笹	賀一郎
副査	教授	波多野	隆介
副査	教授	佐藤	冬樹
副査	助教授	柴田	英昭

学位論文題名

積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態と 地表処理の及ぼす影響

本研究は110ページの和文論文で、引用文献72を含み、5章で構成されている。他に参考論文6編が添えられている。

窒素は、全ての生物にとって必須養分である一方、過剰である場合は様々な問題を引き起こす。近年、人間活動の活発化に伴う大気窒素沈着の増加や、森林施業による窒素循環過程の攪乱などが問題となっており、多様な環境下での窒素循環過程を解明することが必要とされている。植物が栄養源として利用しやすい窒素のうち、硝酸態窒素(NO_3^-)は土壌に吸着されにくいいため、水に伴って移動しやすい。そのため、季節的な降水パターンは系からの NO_3^- 流出に影響するといわれている。積雪地域では、冬期間の降水が融雪期に集中して土壌に供給され、土壌水や渓流水中の NO_3^- 濃度が大きく変動するものと考えられる。また、このような地域において、窒素循環過程に何らかの人為的な攪乱が生じると、特に融雪期には多量の窒素が流出する可能性が想定される。本研究は、とくに積雪・融雪イベントの影響に着目し、森林施業による攪乱の典型的な例として林床植生や表層土壌の除去による樹木の更新補助作業(掻き起こし)の観測を含めて、積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態を解明することを目的とした。

積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の無機態窒素動態を評価するため、降雨(雪)および土壌溶液を通年にわたって採取・分析し、土壌系の窒素濃度や収支の季節変動を求めた。また、植生の窒素蓄積および還元量の観測も行った。土壌溶液の NO_3^- 濃度変動から、夏期における NO_3^- は降雨の少ない時期に表層土壌で生成され、強い降雨によって下層へと移動することが把握された。また、土壌-植生系の窒素収支から、外部から土壌に供給された窒素量の約70%が生態系内に保持されていたことが明らかとなった。リターフールとして植生から土壌へ還元される窒素

量や樹木への窒素蓄積量は、系外からの窒素供給量や土壌からの窒素溶脱量に比べて非常に大きく、生態系の内部循環による窒素移動が卓越していることが示された。融雪期間における土壌からの窒素溶脱量は、年間溶脱量の 60% 以上に相当していた。生物活動が活発な夏期に比べ、気温の低い厳冬期から融雪期にかけては土壌微生物や植生による窒素利用が少なく、積雪や表層土壌に蓄積されていた窒素は、多量の融雪水とともに下層へと溶脱していることが明らかとなった。

次に、掻き起こし処理が土壌中の無機態窒素動態に及ぼす影響、およびそれらに対する融雪イベントの寄与について明らかにするため、林地に掻き起こし処理区と無処理の対照区を設け、降水および土壌溶液の窒素濃度を経時的に調査した。掻き起こし処理区では、土壌溶液中の NO_3^- 濃度が対照区のおよそ 80 倍まで上昇していた。植被除去処理が、植生の窒素吸収を減少させると同時に地温上昇に伴う土壌微生物による硝化を促進したことが要因と考えられた。処理区土壌からの年間 NO_3^- 溶脱量 ($241 \text{ mmol m}^{-2} \text{ y}^{-1}$) は対照区に比べ非常に大きく、融雪期には年間の約 54% に相当する NO_3^- が流出していた。掻き起こしによる土壌窒素環境の変化は、他の栄養塩の動態にも影響し、掻き起こし処理によって多量の NO_3^- やカチオンが系外へ流出することが明らかとなった。

また、掻き起こし処理が土壌の窒素動態に与える影響の経年変化を評価するため、処理区土壌の無機態窒素現存量および植生への窒素蓄積量の経年変化を調べた。さらに、室内実験によって処理後 1 年および 5 年目の土壌の窒素無機化特性を調べ、そのメカニズムを考察した。掻き起こし処理区における土壌 NO_3^- 現存量は、処理後 2 年目まで対照区に比べ高く、その後は徐々に減少する傾向にあった。 NO_3^- 現存量増加の要因として、表土除去に伴う土壌有機物の減少が土壌微生物に対する炭素基質不足を減少させ、それによる窒素有機化の低下が正味硝化速度の増加を引き起こしたものと考えられた。土壌 NO_3^- 現存量の経年減少に関しては、処理後 2-3 年目までは降雨や融雪による土壌からの NO_3^- 溶脱が主な要因であり、処理後 4 年目以降は回復した植生への窒素蓄積が主な要因であった。

これらの結果から、表層土壌が持つ窒素保持や土壌微生物へのエネルギー源の供給が生態系の窒素動態において大きく影響していることから、表層土壌の攪乱を抑えその機能を維持することが、系全体の生態系機能の保全にとって重要であることが示唆された。

以上のように本研究は、積雪寒冷地域の森林生態系における土壌の窒素動態と地表処理の及ぼす影響について明らかにしようとしたものであり、得られた成果は学術的に貴重なものであり、その応用のための基礎資料としても高く評価される。よって審査員一同は、小澤恵が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。