

学位論文題名

森林生態系の物質循環における土壌-植物系の役割

～酸性降下物に対する緩衝機構を中心として～

学位論文内容の要旨

森林生態系の物質循環は土壌と植物の密接な相互関係のもとに、自己施肥系といった独自の循環系を形成している。すなわち、森林植生は土壌から可給態養分を吸収し、その元素を樹体内へ蓄積するとともに、林冠からの溶脱あるいは落葉・落枝の形態で元素を土壌へ還元するといったサイクルを繰り返している。近年、大気からの酸性降下物の沈着がこれらの循環系を損ね、樹木の生育に悪影響を及ぼすという懸念が欧米を中心に議論されてきた。大気から生態系へ供給されたプロトンと土壌-植物系内部に存在する塩基(Ca, Mg, KおよびNa)との交換反応によって、土壌から排出される塩基フラックスが生態系内部での塩基循環フラックスを上回る条件下では、土壌の塩基飽和度が次第に低下し、それによる土壌pHの低下に伴って土壌溶液中の Al^{3+} イオン濃度が上昇する可能性がある。 Al^{3+} は植物にとって有害であり、これによる森林植生の衰退が欧州を中心に報告されてきた。一方、酸性降下物による土壌酸性化の進行と同時に、土壌はその酸を中和する働きを持つことが知られている生態系の物質循環過程においてこの緩衝機構を明らかにするためには生態系の物質収支に基づいて議論することが重要である。

そこで、本研究では森林生態系の物質循環過程における酸性降下物に対する緩衝機構を明らかにするために、同じ土壌に立地する異なる植生の森林生態系において物質循環フラックスを調査し、各部位(植生、土壌)の物質収支に基づいて研究を行い、以下のことを明らかにした。

苫小牧市高丘の火山放出物未熟土に立地する広葉樹林(ミズナラを主体とする落葉広葉樹林の二次林)と針葉樹林(ストロブマツを主体とする常緑針葉樹林の人工林)では、大気からの湿性降下物による年間のプロトン沈着量は平均 $0.65 \text{ kmol c ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、降水の年平均pHは4.31に達し欧米において森林衰退が顕著である地域と匹敵した値であった。しかしながら、森林の著しい衰退や土壌の酸性化は現段階では生じていない。

気象パラメーターを用いた重回帰分析の結果、苫小牧において降水のpHを低下させている主因は南東からの季節風によって臨海工業地帯から供給される非海塩起源の SO_4^{2-} に伴う H^+ であった。

降水として生態系へ流入する物質フラックスが植生タイプに関わらず地点間でほぼ同じであったのに対し、針葉樹林の林冠はその物理的性質によって、大気からの乾性沈着フラックスが同一地域の広葉樹林より大きく、林内雨と樹幹流による SO_4^{2-} フラックスは降雨による SO_4^{2-} の約2.5倍に相当した。また、針葉樹林の林内雨pHは降雨pHと有意な差が認められないのに対し、広葉樹林における林内雨pHは林冠の着葉期間(6~10月)では降雨pHより有意に上昇し、その主要なメカニズムは葉面における H^+ と K^+ の交換反応であった。

林冠での化学的修飾反応を経た後に林内雨や樹幹流として土壌へ流入する酸に対して、林床に存在する堆積粗腐植層(O層)は鉍質土壌へ流入する酸を中和する重要な役割を担っていた。林内雨と樹幹流によってO層に供給された H^+ フラックスの83%(広葉樹林)、60%(針葉樹林)がO層を通過する際に中和され、その主要な機作は、 H^+ とO層固相の塩基性イオン、特に Ca^{2+} との交換反応であった。また、鉍質土層では外部供給 H^+ より土壌内部生成 H^+ 量が多く、それは主としてA層での硝酸化成に由来していた。ただし、その内部生成 H^+ に対して土壌から Ca^{2+} 、 Mg^{2+} を主とした交換態塩基が溶液中に交換放出されることによって土壌浸透水pHの低下が緩衝された。

上に述べた林冠-O層系の高い酸緩衝力は植生の塩基吸収とその還元により維持されている。植生のCa、MgおよびK吸収フラックスの合計は広葉樹林で $8.3\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と針葉樹林の $2.8\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ より約3倍大きかった。この広葉樹林の大きな塩基吸収能が、根群域下への塩基排出フラックスを広葉樹林で $1.8\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と針葉樹林の $3.8\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ より約1/2小さくした原因と考えられた。

土壌の酸中和容量($\text{ANC}_{(s)}$)の減少速度から求められる土壌の酸性化速度($\Delta \text{ANC}_{(s)}$)は広葉樹林で -4.0 、針葉樹林で $-2.3\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と見積もられた。ただし、この $\Delta \text{ANC}_{(s)}$ の内容は地点間で異なり、広葉樹林では土壌からの植生による塩基の正味蓄積の影響が強かったのに対し、針葉樹林では根群域下への塩基溶脱の影響をより強く受けていた。広葉樹林での植生による塩基吸収は林冠-O層系の高い酸緩衝機能を維持すると共に、樹体内へ塩基を蓄積することによって次世代のための酸緩衝力を保持する役割を担っていると考えられる。

また、酸中和のための塩基量は、鉍質土壌では溶液中の Al^{3+} 濃度を上

昇させないpH4.5以上に維持する根群域の交換態塩基量とO層の全塩基現存量であり、広葉樹林で77, 針葉樹林で57kmolc ha⁻¹存在する。これらの値は現況の土壌からの塩基減少速度に対して、それぞれ17.2年, 21.0年分の量に相当する。両地点の母材は約250~300年前に堆積したものであり、その交換態塩基は堆積後1年目の自然降雨によって80%以上が溶脱され得る。したがって、現況の土壌の塩基飽和度は平衡状態にあり、土壌中の塩基減少量は鉱物の風化によって補われていると考えられる。この風化速度は広葉樹林で1.0, 針葉樹林で0.9kmolc ha⁻¹ y⁻¹と見積もられ、外部供給と溶脱にバランスしていた。なお、土壌の全塩基現存量はそれらの鉱物風化速度において、それぞれ28000年, 31000年分に相当している。これらのことは本調査地の土壌が現況の塩基収支のもとで十分大きな緩衝容量を有していることを示していた。

以上のように植生による土壌からの塩基の吸収および林床への濃縮・還元過程は、土壌-植物系の酸緩衝機能や系外への元素排出フラックスに強く影響していた。言い換えると、酸性降水物に対する森林生態系の緩衝機構は元素の生物地球化学的循環過程によって支配されており、本調査地の広葉樹林ではその過程が元素の地球化学的循環より顕著に大きいことによって生態系の酸緩衝機構が維持されていた。今後の研究課題としては、広葉樹林と針葉樹林の物質循環に対する、広葉樹と針葉樹の混交林生態系連鎖の意義やその相互作用を明らかにすることであろう。本研究で得た知見ならびに評価方法を他の地域にも適用することによって、人為の影響下にある森林資源について各生態系あるいは流域単位で維持・管理する上での具体的な方策が明らかになるであろう。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介
副 査 教 授 但 野 利 秋
副 査 教 授 笹 賀 一 郎
副 査 助 教 授 佐 藤 冬 樹

学 位 論 文 題 名

森林生態系の物質循環における土壌－植物系の役割

～酸性降下物に対する緩衝機構を中心として～

本論文は12章で構成され、表45、図45、引用文献145を含む総頁数131頁の和文論文である。別に、参考論文4編が添えられている。

森林生態系における物質循環は①地球化学的循環（大気からの流入と土壌からの溶脱）②生物地球化学的循環（植物吸収、林冠からの溶脱、落葉・落枝の還元）③生物化学的循環（植物体内における転流）から構成される。生態系はこれらの物質循環フラックスのバランスにおいて維持されているので、大気からの酸性降下物の生態系への影響評価は物質収支に基づいて定量的に行う必要がある。本研究は、樽前火山放出物未熟土に立地する北海道大学附属苫小牧地方演習林内の広葉樹林（ミズナラ主体）と針葉樹林（ストロブマツ）において、物質循環構成フラックスを測定し、土壌と植物の酸緩衝機構の定量化を試みたものである。その成果を要約すると以下の通りである。

1. 降水の年平均pHは4.31であった。それによる H^+ 流入フラックスは針葉樹林、広葉樹林とも $0.65 \text{ kmol c ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に達し、これは、欧米の森林衰退地域に匹敵していた。この主因は非海塩起源の SO_4^{2-} に伴う H^+ であり、南東からの季節風により供給されていると推察された。

2. 乾性降下物による SO_4^{2-} 流入フラックスは、針葉樹林で広葉樹林の約9倍に達した。針葉樹林の林内雨pHは降雨と差がなく低かったのに対し、広葉樹林の林内雨pHは降雨より有意に上昇していた。その主要機構は、葉面における H^+ と K^+ の交換反応であった。林床に流入する H^+ は広葉樹林で0.13、針葉樹林で $0.4 \text{ kmol c ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。

3. 林床流入 H^+ は、広葉樹林の粗腐植層で83%が、針葉樹林では60%中和された。その機構は、両粗腐植層が持つ Ca^{2+} との交換反応であった。

4. 鉍質土層で生成した NO_3^- 量は、広葉樹林で4.5, 針葉樹林で3.9 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、硝酸化成による大きな内部生成 H^+ が認められた。その H^+ は土壤の交換態塩基と交換し吸着され、土壤溶液pHは5~6に緩衝されていた。

5. 交換放出した塩基の植生による吸収フラックスは、広葉樹林では8.3 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と針葉樹林の2.8 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ より約3倍大きかった。一方、土壤からの塩基の流出フラックスは、広葉樹で1.8 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と針葉樹林の3.8 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ より約1/2小さかった。

6. 外部供給・内部発生酸の中和物質としての交換態塩基の減少速度から見積もった土壤の酸性化速度は、広葉樹林では-4.0 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 針葉樹林では-2.3 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。その酸性化の主体は針葉樹林では土壤からの溶脱であるのに対して、広葉樹林では植物吸収であった。広葉樹林は土壤の酸性化と引換えに、林冠と粗腐植層の高い酸緩衝能を得ているように見受けられた。

7. 植生に被害を与える Al^{3+} が溶出しない土壤pH4.5以上を維持するための塩基現存量は、広葉樹林で77, 針葉樹林で57 kmolc ha^{-1} であった。これらは現況の土壤からの塩基減少速度に対して、それぞれ17.2年, 21.0年分である。しかし、現況の土壤の交換態塩基は平衡状態にあることを考慮して、塩基減少を補う鉍物の風化速度を見積もったところ、広葉樹林で1.0, 針葉樹林で0.9 $\text{kmolc ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と大気からの流入と土壤からの溶脱にバランスしていた。なお、土壤の全塩基現存量はこれらの鉍物風化速度に対して、それぞれ28000年, 31000年分であった。

以上のように、本研究は森林生態系の物質循環フラックスの内容を定量化したと同時に、酸に対する生態系の緩衝機構について解析し、植生の違いが土壤と植生の保有する酸緩衝能力の現れ方を変えていることを定量的に明らかにした。この研究は森林生態系の物質循環が保持する機能を評価する方法の構築とその応用に大きく貢献するものである。よって審査員一同は、別に行った最終試験の結果と合わせて、本論文の提出者柴田英昭は博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。