

スギ人工林の有機物層における無機態窒素の 動態と水に伴う養分移動量の把握

保原 達・徳地 直子

Nutrient dynamics in the organic horizon of the japanese cedar
(Cryptomeria japonica).

Satoru HOBARA and Naoko TOKUCHI

要 旨

森林生態系の物質循環において重要な位置を占める有機物層について、そこでの物質移動量を推定するため、スギ人工林の斜面における有機物層の分布と、有機物層における無機態窒素のプールサイズ・窒素無機化特性、および降水が有機物層を通過する際の溶存物質濃度の変化について調査した。有機物層は斜面の上部ほど厚く堆積し、厚さの違いはおもにOe+Oa層の厚さの違いと対応していた。Oe+Oa層はOi層より無機態窒素プールが大きく、これは無機態窒素の保持機構から判断するに、Oe+Oa層がOi層より腐植含有率、水分含有率において高いためと考えられた。窒素無機化ポテンシャルもOe+Oa層がOi層より大きい値を示した。これらの結果、Oe+Oa層の厚い斜面の上方で単位面積当たりの無機態窒素量、窒素無機化ポテンシャルが高くなった。培養により生成される無機態窒素の形態は、斜面の下方ほど NO_3^- -Nの割合が高まった。無機態窒素の形態は無機化・不動化のエネルギー源である有機態炭素量に依存すると考えられたが、抽出可能な有機態炭素濃度と硝化率の間に明瞭な関係はみられず、可給態の有機態炭素の同定が必要であると考えられた。斜面上部では、降水の有機物層の通過に伴い NH_4^+ -N、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度の上昇がみられ、生育期間中の養分移動量はNで $32.2\text{kg ha}^{-1} 5\text{months}^{-1}$ 、Caで $24.7\text{kg ha}^{-1} 5\text{months}^{-1}$ 、Kで $31.2\text{kg ha}^{-1} 5\text{months}^{-1}$ と推定された。NおよびKでは植物による年間の養分吸収量にほぼ等しく、有機物層は分解および養分供給の場として機能していることが示された。一方、斜面下部では溶存物質濃度の上昇は明らかでなく、有機物層がリターの細分化の場となっていることが示唆された。

は じ め に

生物体の構成要素として質的にきわめて重要な元素である窒素は、森林土壌においてその90%以上は有機態として存在し、植物にとって利用可能な無機態窒素が森林土壌中の窒素全体に占める割合は低い¹⁾。無機態窒素はリターの分解過程において、有機態窒素の無機化によりアンモニア態窒素(NH_4^+ -N)が、さらにアンモニア態窒素の酸化(硝化作用)により硝酸態窒素(NO_3^- -N)が生成される。生成された無機態窒素は土壌中で NH_4^+ -Nは正、 NO_3^- -Nは負に帯電しており、 NH_4^+ -Nは一般に負に帯電した林床のリターや土壌に吸着・保持されやすく、 NO_3^- -Nは雨水などにより溶脱しやすいという、異った移動性を持つ²⁾。そのため森林土壌中の窒素循環を把握するには、窒素の形態変化および鉛直方向での物質移動についての理解が必要である。

森林土壌の中でもその最表層を占める有機物層（リター層）は、森林生態系において水分や養分およびエネルギーの主要な蓄積場所となっているばかりか³⁾、パーティクルや溶脱をうけた物質などにより下層土壌への養分の供給源となっており^{4) 5)}、物質循環を把握するうえで非常に重要な構成要素である。これら有機物層は、その有機物蓄積（堆積）様式に温度・水分などの環境条件による違いがみられることが知られる。とくに我が国は急峻な地形が多く、山地の斜面では上部と下部とで有機物層の堆積様式が異なり、乾燥した斜面の上部ほど有機物層を構成する層位のうちOe+Oa層（分解が進んで黒色を呈した有機物からなる）が厚く堆積する傾向がある⁶⁾。そのため、斜面の上部と下部とでは、堆積様式を反映して有機物層内および有機物層を介した物質循環様式が異なることが予想される。そこで本研究では、有機物層における無機態窒素の動態（プールサイズの変動など）と、降雨等による下層への物質移動とを考えあわせることにより、堆積様式の異なる有機物層の森林生態系内での物質循環における役割の評価をこころみた。具体的には、スギ造林地の斜面にプロットを設置し、1) 斜面に沿った有機物層の分布をOi層（ほとんど未分解の有機物からなる）とOe+Oa層に分けて測定・分析し、2) Oi, Oe+Oa層を培養してその前後での抽出液の窒素の形態変化から有機物層の窒素無機化特性を調べた。さらにOi, Oe+Oa層から鉱質土層への養分動態に関する知見を得るため、3) 斜面上の腐植堆積様式の異なる2地点において有機物層を通過した溶液中の溶存態成分を分析した。

調査地の概要

試験地は滋賀県東南部竜王山内の45年生スギ造林地である。調査地の地質は二畳-ジュラ系古生層、丹波・美濃帯に属し、砂岩、泥岩、チャート、及び石灰岩が存在する。有機物層試料および有機物層通過溶液を採取するにあたり、造林地内の南向き斜面上に斜面の下部から上部に向かって斜距離135m×幅5mのベルト状プロットを設け、斜面下端から斜距離15mおきにサブプロットを設定した。プロット内はおおむね植林されたスギにより林冠が閉鎖しているが、斜面の尾根では一部林冠の閉鎖しないギャップがみられる。斜面プロットの平均斜度は38度、プロット下端、上端の標高はそれぞれ765m、850mであった。林内雨および有機物層通過溶液を採取した期間中（1996年6月～1996年11月）の降水量は874.5mmであった。

有機物層の厚さの測定・有機物の採取および試料の調整

斜面上の有機物層の堆積様式を把握するため、1997年5月に同斜面プロット内のOi層およびOe+Oa層の厚さを測定した。厚さは斜面に垂直にリターを切断したのち、その断面のOi, Oe+Oa層各層の高さを測定しこれをOi, Oe+Oa層の厚さとした。測定は斜距離で3m毎に6繰り返しで行い、3mのライン毎に平均をとった。また分析・培養用のリターは、1996年6月に斜面プロットにおいて、下端から15m毎に3繰り返しでOi, Oe+Oa層の各層毎に採取し持ち帰った。実験室へ持ち帰ったOi, Oe+Oa層はただちに礫や細根、および不均等に存在するスギ以外のリターを取り除いた。そのうえでなるべく均質なスギの葉の部分だけを選び出し被験試料とした。

有機物層通過溶液の採取

上記プロットにおいて1996年6月に腐植の堆積様式の異なるプロット下端から15mと90mの地点をそれぞれ斜面下部用と斜面上部用の採取地点とし、それぞれ有機物層通過溶液用のテンションフ

リー・ライシメーター (Fig.1) を3つ、林内雨採取用の幅0.1m×長さ1 mのといを1つずつ設置した。テンションフリー・ライシメーターについてはサンプルを採取しない期間が長いので、ライシメーター中の有機物層が採取しない期間中容易に取り外して周辺の森林土壌と同様の分解作用をうけるように以下のように工夫した。まず設置地点の有機物層を円柱状に取り出して金網に入れ、それを塩化ビニル製の桶で受けるようにし、その際やむなく根系を切断した。そして採取期間(1週間前後)以外の期間は塩化ビニル製の桶だけを取りはずして、金網内の有機物層が周辺の有機物層や土壌と接触できるよう配慮した。有機物層通過溶液および林内雨は1996年7月～11月にかけて計5回採取した。採取した水は実験室へ持ち帰り、 $3.0\mu\text{m}$ のフィルターで濾過した後冷蔵保存し被験試料とした。

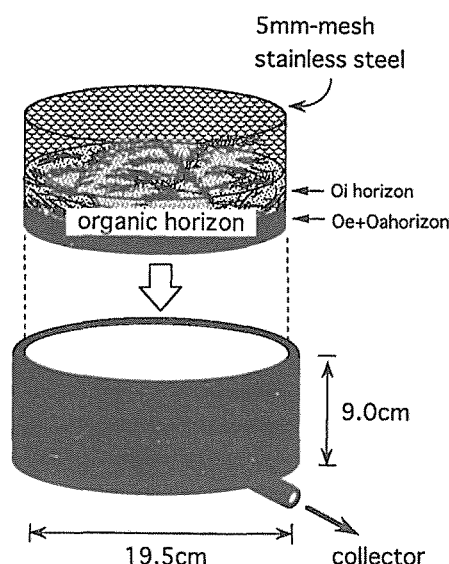


Fig.1 Tension-free lysimeter

有機物の分析方法

Oi, Oe+Oa層に含まれる物質について分析するため、Oi, Oe+Oa層の被験試料を重量を測定した上で2N-KClで濾過抽出した。そして抽出液中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素、全有機態炭素の各濃度を測定し、抽出試料重とその含水率からOi, Oe+Oa層各層中のそれぞれの絶乾重当たりのプールサイズを求めた。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度はインドフェノール法、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は亜鉛触媒下で硝酸態を亜硝酸態に還元後スルファニルアミド・ α -ナフチルジアミン法を用いて比色定量により求めた⁷⁾。また抽出液中の全有機態炭素濃度を全有機態炭素計(島津社製 TOC-5000)により求めた。各層位の含水率は105℃の絶乾により求めた。

有機物の培養方法

Oi, Oe+Oa層の被験試料を約10gずつポリエチレンカップに量り取りパラフィルムで蓋をした上で穴を開け、重量をイオン交換水を加えながら初期重に保ち30℃で28日間培養した。培養後に各被験試料について上記の分析法と同様の方法で $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ のプールサイズを測定した。そして培養前後の無機態窒素($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$)のプールサイズの差をもって窒素の純無機化速度とし、Oi, Oe+Oa各層の窒素無機化ポテンシャルの指標とした。同様に培養前後の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ のプールサイズの差をもって純硝化速度とし、Oi, Oe+Oa各層の硝化ポテンシャルの指標とした。

有機物層通過溶液及び林内雨の分析方法

Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の各濃度を、高速液体クロマトグラフィー(島津社製 HIC-6A)により測定した。有機態炭素濃度は全有機体炭素計(島津社製 TOC-5000)をもちいて、全窒素濃度は微量全窒素測定装置(住友化学製)により650℃で分解した後比色法により測

定した。pHは複合型ガラス電極（堀場製作所 ATC pHメーターD-13）を用いて測定した。

結 果

有機物層の堆積様式

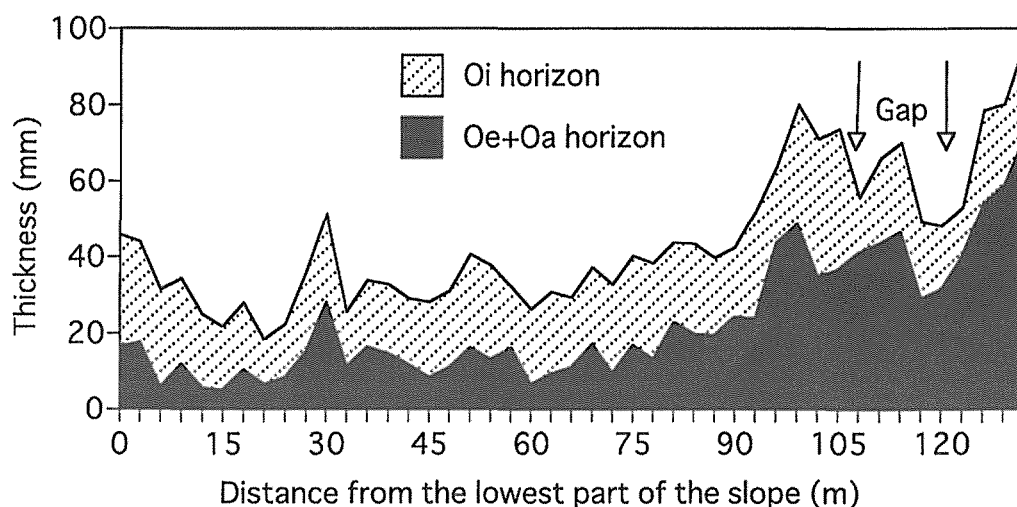


Fig. 2 Thickness of Oi and Oe+Oa horizon.

Fig. 2に本調査プロット内で（以後、下端からとする）測定したOi、Oe+Oa層の厚さを示す。倒木や落枝、それに傾斜の緩急などによりOi、Oe+Oa層とも全般的に値はばらついた。Oi層の厚さは斜面下端から（以後、下端からとする）120m付近のギャップの地点を除いて、斜面のどの位置でも30mm前後の値を示した。とくにOe+Oa層は斜面の上方ほど厚くなる傾向がみられ、とくに下端から90mを越えるとOe+Oa層が極端に厚くなっていた。また斜面下部ではOi層の占める割合が大きく、Oe+Oa層はほとんどが粉末状のOa層（もとの組織が判別できない程度に分解されたもの）からなっていた。

含水率は、Oi層は斜面のどの地点でも45%前後の値を示したが、Oe+Oa層は下端から0～90mまでは60～80%の範囲にあり比較的高い値を示したが、下端から90mを越えると60%を下回って徐々に低くなっているように見られた（Table. 1）。

Table. 1 water contents (%)

Distance from the lowest part of the slope(m)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
Oi horizon	39.2	41.0	41.3	39.6	38.8	46.5	44.7	47.0	45.0	47.0
Oe+Oa horizon	74.2	66.7	73.4	67.5	74.1	67.0	76.3	61.6	57.6	53.9

有機物層から抽出された無機態窒素および有機態炭素のプールサイズ

Fig. 3 に Oi, Oe+Oa 層から抽出された NH_4^+ -N および NO_3^- -N のプールサイズを示す。Oi 層の無機態窒素のプールサイズは、 NH_4^+ -N は斜面のどの位置でも $10\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ 前後の値を示し、斜面に沿った一定の傾向はみられなかった。 NO_3^- -N のプールサイズは $1 \sim 5\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ の範囲にあり、斜面の上方に向かってやや高くなる傾向がみられた。Oe+Oa 層については、 NH_4^+ -N は下端から 90m までで $30 \sim 50\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ の範囲にあったが、下端から 105m 以上の地点ではどこも $20\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ 以下の値をとり、下端から 90m までの地点を境にそれより下方では上方の 3 倍に近い値を示した。 NO_3^- -N も下端から 30m までは $15 \sim 30\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ の範囲にあったが、下端から 45m 以上の地点では $10\text{mg-N kg dry matter}^{-1}$ 以下の値であり、斜面に沿った傾向としては、 NH_4^+ -N の場合にみられたように、下端から 45m を境に、下方で上方の 3 倍近い値を示した。全無機態窒素プールに占める NO_3^- -N の割合は、斜面の上方に向かって低下する傾向がみられた。

Fig. 4 に Oi, Oe+Oa 層から抽出可能な全有機態炭素のプールサイズを示す。抽出可能な全有機態炭素は Oi 層で $350 \sim 700\text{mg-C kg dry matter}^{-1}$ の範囲、Oe+Oa 層で $550 \sim 1600\text{mg-C kg dry matter}^{-1}$ の範囲にあり、どの地点でも Oe+Oa 層で Oi 層より高い値を示した。Oi 層、Oe+Oa 層とも斜面に沿った一定の傾向はとくにみられなかった。

有機物層の窒素無機化特性

Fig. 5 に培養期間中 (28日間) の Oi, Oe+Oa 層の純無機化速度と純硝化速度を示す。Oi 層では斜面上の位置に関わらず、純無機化速度、純硝化速度ともにほとんどが $10\text{mg-N kg dry matter}^{-1} 28\text{days}^{-1}$ 前後の値を示した。Oe+Oa 層の純無機化速度は $150 \sim 450\text{mg-N kg dry matter}^{-1} 28\text{days}^{-1}$ の範囲で、Oi 層の 10 倍以上の値を示した。また Oe+Oa 層の純硝化速度は $5 \sim 350\text{mg-N kg dry matter}^{-1} 28\text{days}^{-1}$ の範囲にあり、純無機化速度と同様に Oi 層の 10 倍以上の高い値を示した。Oe+Oa 層における純無機化・硝化速度の斜面に沿った傾向

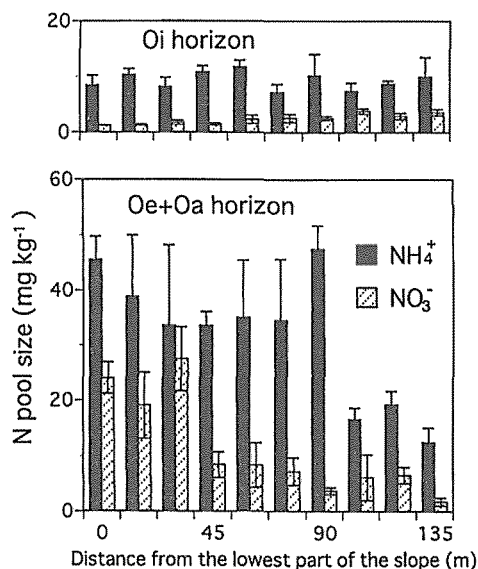


Fig. 3 Extractable inorganic N pool sizes Oi and Oe+Oa horizons. Bars represent the means and lines represent standard deviations.

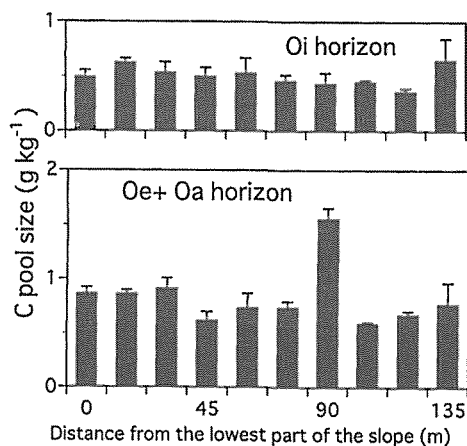


Fig. 4 Extractable organic C pool sizes of Oi and Oe+Oa horizons. Bars represent the means and lines represent standard deviations.

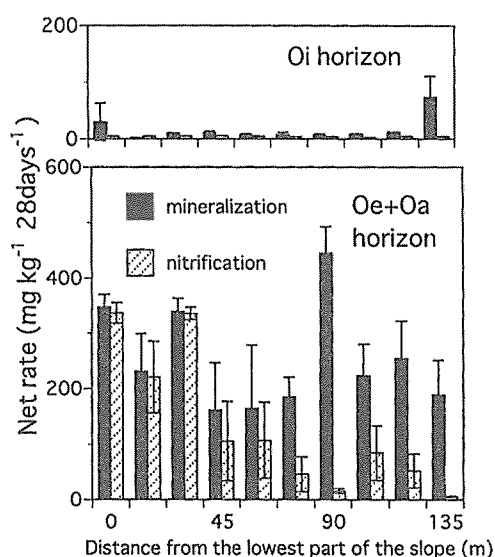


Fig. 5 Net rates of N mineralization and nitrification during laboratory incubation of Oi and Oe+Oa horizons. Bars represent the means and lines represent standard deviations.

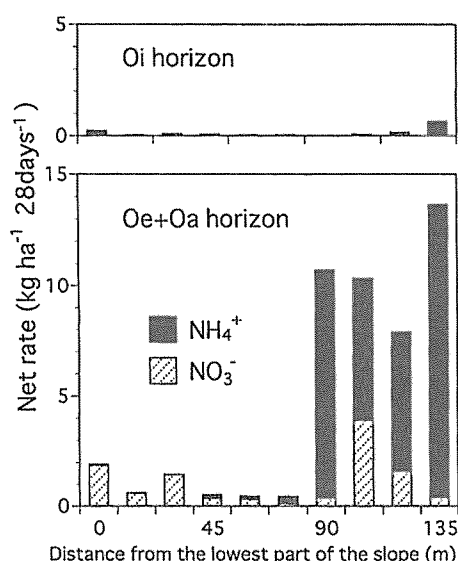


Fig. 6 Areal based net rates of N mineralization and nitrification during laboratory incubation of Oi and Oe+Oa horizons.

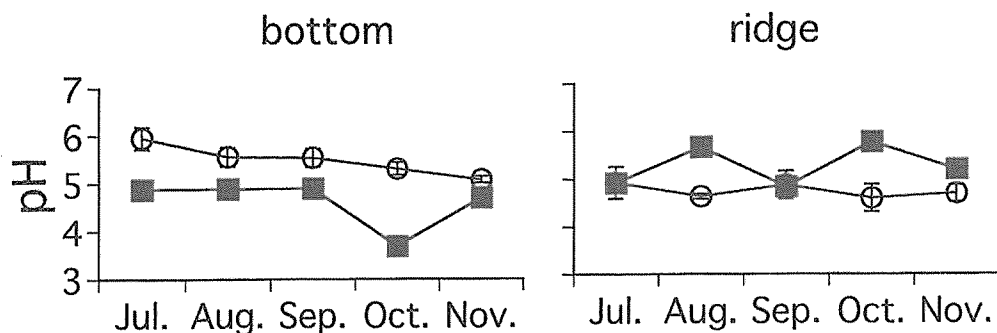


Fig. 7 pH values of throughfall (■) and organic horizon leachate (○). Lines represent standard deviations.

としては、純無機化速度には一定の傾向がみられなかったが、純硝化速度については斜面の下ほど明らかに高い値を示し、斜面下端からの距離と高い負の相関が得られた ($r = -0.783$, $p < 0.001$, $n=30$)。その結果、生成される無機態窒素の形態は、斜面の下方ほど NO_3^- -N の割合が高くなった。

Fig. 6 に調査地における単位面積当たりの Oi, Oe+Oa 層中の無機態窒素生成速度、硝酸生成速度を示す。各値は、調査地の下端からの距離毎の有機物層の厚さと量との関係⁸⁾を用い、これと本調査で得られた有機物層の厚さとから各地点における単位面積当たりの有機物量を求め、その値と単位重量当たりの各速度の積から算出した。Oi 層ではアンモニア、硝酸のどちらの生成速度も 0.6 kg ha^{-1}

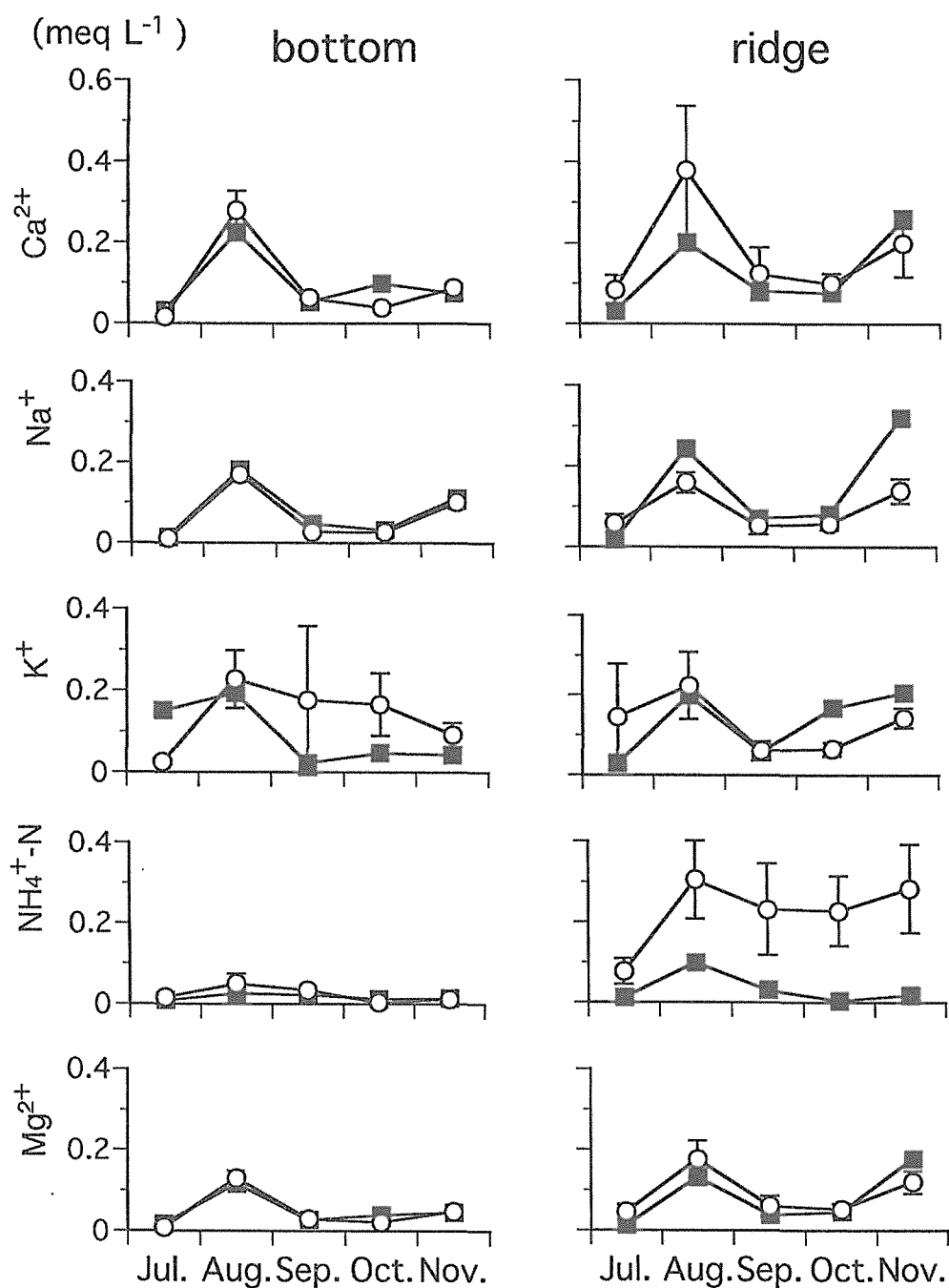


Fig. 8 Cation concentrations in throughfall (■) and organic horizon leachate (○).
Lines represent standard deviations.

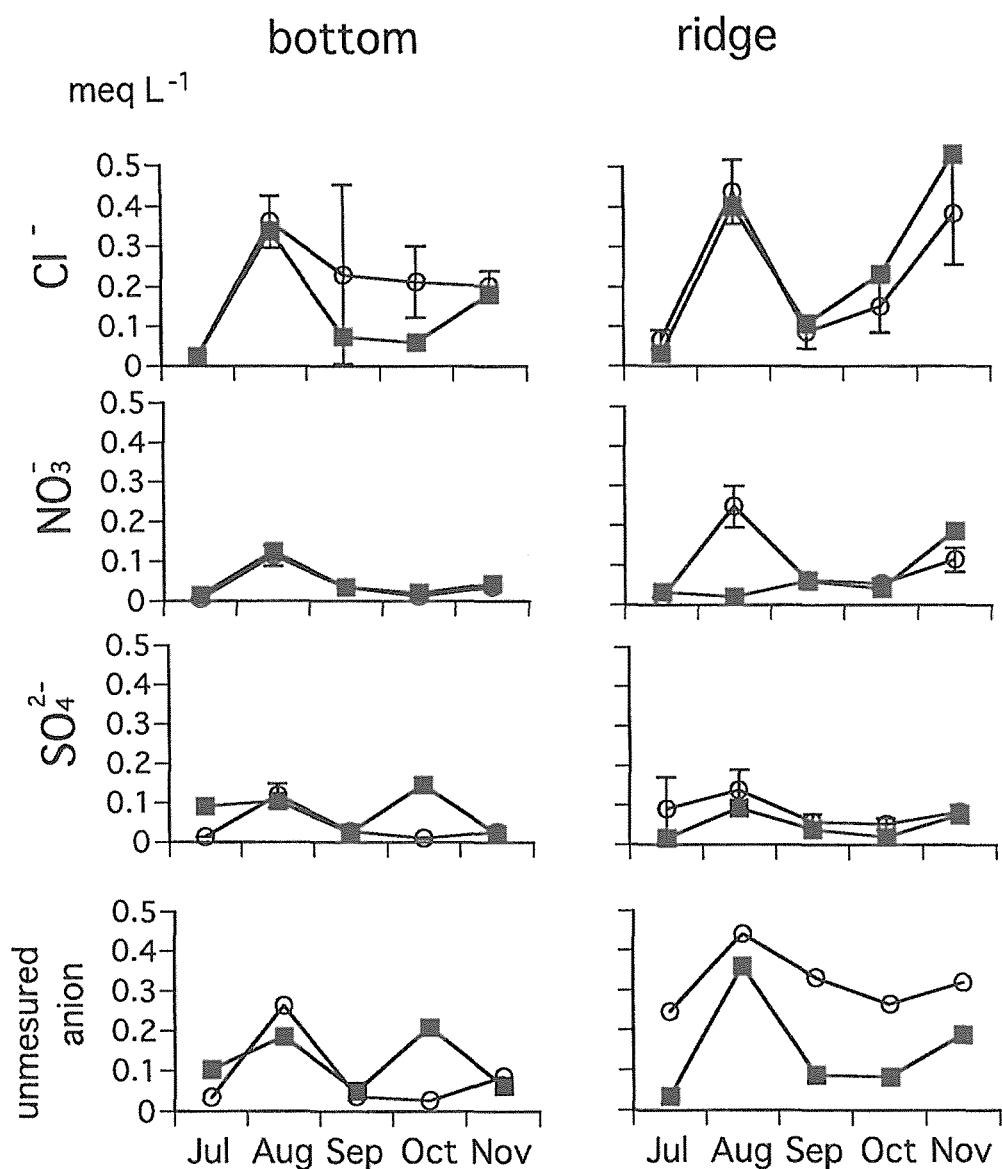


Fig. 9 Anion concentrations in throughfall (■) and organic horizon leachate (○). Bars represent deviations.

28days⁻¹以下の値を示し、斜面に沿った傾向はみられなかった。Oe+Oa層のアンモニア生成量は0.1～14kg ha⁻¹ 28days⁻¹の範囲にあり、下端から90m以上の地点で下端から75m以下の地点より数十倍高くなっていた。Oe+Oa層の硝酸生成量については0.1～1.9kg ha⁻¹ 28days⁻¹の範囲にあり、重量ベースでは斜面の下方ほど大きかったのに対し、面積ベースでは斜面に沿った傾向はみられなかった。

有機物層通過溶液中の成分濃度

Fig. 7 に林内雨, 有機物層通過溶液のpHの値を示す。斜面下部では有機物層通過溶液のpHが常に林内雨のpHを上回ったのに対し, 斜面上部では有機物層通過溶液のpHは常に林内雨のpHを下回る傾向にあった。季節変動は林内雨ではとくにみられなかったが, 有機物層通過溶液では斜面下部で7~11月にかけて低下する傾向にあった。

Fig. 8 に斜面上部, 下部における林内雨および有機物層通過溶液中に溶存していたカチオン濃度を, Fig. 9 にアニオン濃度を示す。溶液中では電気的中性が保たれることから, アニオンとカチオンの総等量濃度の差が生じる場合, カチオン等量がアニオン等量を上回った分をunmeasured anionとした。アニオン等量がカチオン等量を上回ることにはなかった。全般的にどのイオン濃度も斜面下部より上部で高く, 最高値は8月にみられることが多かった。斜面下部では9~11月に Cl^- と K^+ 濃度が有機物層通過溶液で高かったことを除いて, 林内雨と有機物層通過溶液との間での濃度の違いはほとんどみられなかった。一方斜面上部では NH_4^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , unmeasured anion濃度は, ほとんどの月も有機物層通過溶液が林内雨よりも高い値を示した。その他の成分については, 7~9月では林内雨よりも有機物層通過溶液, 10, 11月では有機物層通過溶液よりも林内雨の方が高い傾向にあった。斜面上部の NO_3^- 濃度は, 8月に有機物層通過溶液が林内雨よりも5倍近く高い濃度を示した。季節的な変動としては, 斜面上部・下部に関わらず, Na^+ と Cl^- と K^+ と Mg^{2+} の各イオン濃度が, 8月に最高値をとり, 9月に一旦低下しその後秋に向かって徐々に上昇するというよく似た変動を示した。

Fig.10に斜面上部, 下部において林内雨および有機物層通過溶液中に溶存していた全有機態炭素濃

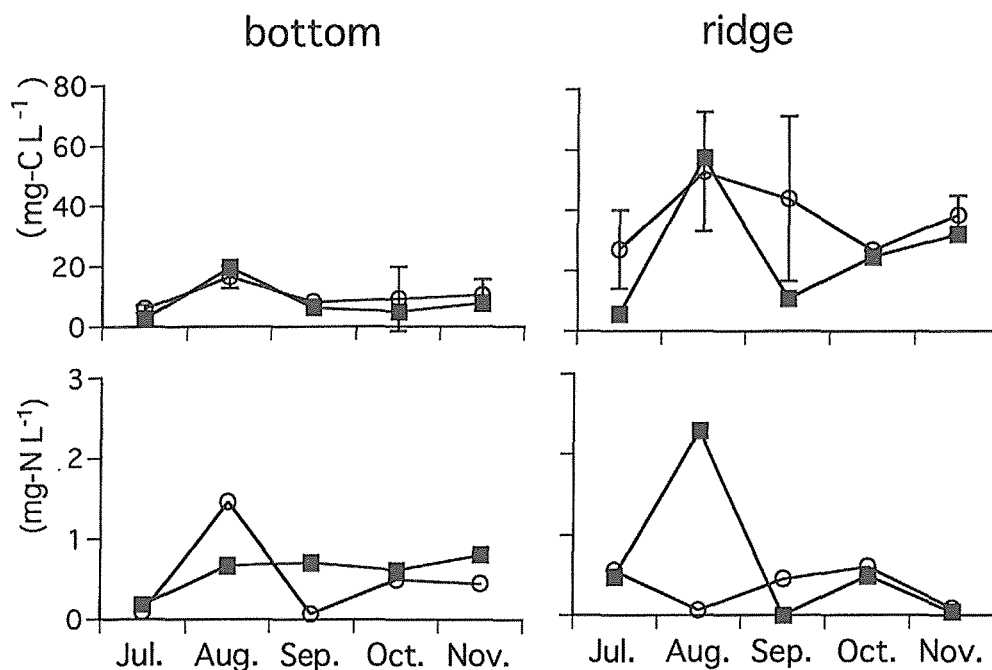


Fig.10 Organic carbon and organic nitrogen concentrations in throughfall (■) and organic horizon leachate (○). Lines represent standard deviations.

度, 全有機態窒素濃度を示す。全有機態炭素濃度は, 林内雨, 有機物層通過溶液とも斜面下部で $1 \sim 20 \text{ mg-C L}^{-1}$, 斜面上部で $5 \sim 60 \text{ mg-C L}^{-1}$ の範囲にあり, 有機物層通過溶液の方が林内雨よりやや高い傾向にあった。とくに斜面上部の全有機態炭素濃度については林内雨では 8 月を除いては $5 \sim 30 \text{ mg-C L}^{-1}$ の範囲にあったのに対し, 有機物層通過溶液ではどの月も $25 \sim 60 \text{ mg-C L}^{-1}$ の高い値を示した。全有機態窒素濃度はほとんどが 0.5 mg-N L^{-1} 前後の値を示し, 斜面上部と下部, 林内雨と有機物層通過溶液に関して一定の傾向はみられなかった。

考 察

斜面に沿った有機物堆積量

本調査プロットの Oi, Oe+Oa 層の厚さは, 斜面下端からの距離がほぼ同じ地点でも, 樹幹からの距離によるリターフォール量の違いや微地形などの物理的な要因によると考えられる不均一性がみられた。しかし, 全体的にみると Oi 層の厚さは斜面のどの位置でもほぼ同じであり, 分解の進んだ Oe+Oa 層については斜面下部のものほど水分を多く含み厚さが薄くなる傾向にあった。一般に斜面の上部では水分が不足しがちなために分解が遅く, そのために Oe+Oa 層が厚く堆積していると言われる⁶⁾ が, 本研究結果もそのことがほぼ当てはまると考えられた。

斜面上の異なる位置における窒素無機化特性

無機態窒素のプールサイズおよび窒素無機化特性に関しては, Oi 層と Oe+Oa 層とで大きな違いがみられ, Oe+Oa 層で Oi 層の 10 倍以上の値を示した。これは, おもに Oi 層と Oe+Oa 層とで無機化と不動化のバランス⁹⁾, および無機態窒素の保持能力が異なることが大きく影響していると考えられる。本研究で測定された窒素無機化特性は, 純無機化速度と純硝化速度であり (Fig. 5), 窒素の総動態量を考慮しないプールサイズの変化である。そのため総無機化速度・不動化速度ともに大きい場合と, 総無機化速度・不動化速度ともに小さい場合のいずれも純無機化速度が変わらない可能性がある。Oi 層では Oe+Oa 層に比べて明らかに C/N 比が高く⁶⁾, エネルギーとしての炭素の availability が高いために無機態窒素の総不動化が大きいことが考えられる¹⁰⁾。すなわち, Oi 層では総不動化速度が高いために純無機化速度が低くなったと考えられる。また, 無機化された窒素の保持能力に関しては, 森林土壌ではアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) は負に帯電した土壌コロイドに吸着されやすく, 硝酸態 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) は水の動きに伴って移動しやすい。そのため $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の保持は腐植などの量に, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の保持に関しては水分保持力に依存すると考えられる。ほとんど未分解の有機物である Oi 層は, 腐植化の進んだ形態である Oe+Oa 層と比較して, 腐植含有量および水分保持量ともに小さく, 無機態窒素のプールサイズも Oe+Oa 層に較べて Oi 層で小さくなったのであろう。また, Oe+Oa 層で斜面下方ほど $\text{NO}_3^-\text{-N}$ のプールサイズが大きかったのは, Oe+Oa 層では斜面下方ほど硝化ポテンシャルが大きく, 水分含有量が増加していたことが $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の保持にはたらいたためと考えられる。

有機物層の硝化ポテンシャルについても Oe+Oa 層で斜面の下方ほど高く, 水分含有率と強い相関があり, 斜面の下方の Oe+Oa 層ほど硝化をおこなう硝化菌に有利な環境条件であることが示唆された。硝化菌は, 独立栄養生物であるため $\text{NH}_4^+\text{-N}$ を酸化する際のエネルギーを有機物に依存しないが, 微生物による $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の不動化にはエネルギー源となる有機物が必要となる。そのため, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ に関する微生物間の競争において, エネルギー源となる有機物の不足に伴い硝化菌が有利になると考えられている¹⁰⁾。筆者らは有機物層から抽出された全有機態炭素のプールサイズを微生物の不動

化エネルギー源の指標としたが¹¹⁾、これによつては斜面の下方でエネルギー源が少ないことは示されなかった。土壌有機物は質的にきわめて複雑多様なため、今後微生物が必要とするエネルギー源の質的把握を行ったうえで、エネルギーが不動化の律速になっているかどうかの検証が必要である。

有機物層通過溶液と窒素無機化特性との関わり

有機物層通過溶液のpHは、斜面上部では林内雨と同じかそれより低く、斜面下部では林内雨より高い結果となった。Harutaら¹²⁾によれば、Oe+Oa層の厚い有機物層を通過した降雨では最大でpHが3程度にまで酸性度が増すこともある。調査プロット斜面下部では有機物層がOe+Oa層をあまりもたなかったのに対し、斜面上部ではほぼ90%がOe+Oa層であった。そのためOe+Oa層が厚く堆積する、すなわち分解速度が遅く養分蓄積量の多いところでは、腐植酸の生成が活発であること¹³⁾などにより有機物層がH⁺濃度を増加させる働きがあるものと考えられる。

降雨が有機物層を通過した際のイオン濃度の変化に関しては、斜面上部でNH₄⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、unmeasured anion濃度の上昇がみられた。NH₄⁺の斜面上部での林内雨と有機物層通過溶液との濃度差に関しては、Oe+Oa層では斜面の上部で単位面積当たりのアンモニア態窒素生成ポテンシャルが高い (Fig. 6) ことに起因するものと考えられる。森林土壌では、土壌下層へ移動する窒素の形態はNO₃⁻であることが多いことが知られている。しかし調査地の斜面上部では、NO₃⁻濃度の上昇は8月を除いてはそれほど顕著なものではなかった。おそらく、斜面上部では硝化ポテンシャルが低いために、斜面下部ではOe+Oa層自体が薄いために、いずれの斜面位置でもNO₃⁻濃度の上昇がみられなかったものと考えられる。すなわち有機物層通過溶液の無機態窒素形態は、おもにOe+Oa層の窒素無機化特性と量に依存するものと考えられた。またNH₄⁺濃度の上昇に伴ったCa²⁺、SO₄²⁻濃度の上昇は、斜面上部でリターの分解産物が有機物層通過溶液に含まれた結果であると考えられる。unmeasured anionもNH₄⁺などと同じく斜面上部で有機物層通過により濃度が上昇したが、pHが5以下だったことなどから、これは有機物層を通過する際に、重炭酸イオン (弱酸) ではなく有機酸が加わったことによる変化であるように考えられる。有機酸は植物の根系から滲出することが知られるが、本調査では有機物層にライシメータを設置する際にやむなく根系を切断しており、有機物層通過に伴って加わった有機酸は分解由来の腐植酸であると考えられる。これはpHにより得られた考察を支持するものである。すなわち、降雨はOe+Oa層の厚い有機物層を通過することにより、分解産物である腐植酸を含んで酸性度が林内雨よりも高くなると考えられる。

分解により生成されるこれらの物質濃度は、分解の温度依存性と乾燥による濃縮のため、8月に濃度のピークがみられたのであろう。一方、斜面上の位置に関わらず季節的な傾向が共通してみられたNa⁺、Cl⁻、Mg²⁺などは、海塩を起源とする物質と考えられ¹⁴⁾、季節風などの影響によるものであると考えられる。

有機物層通過溶液中の有機態炭素濃度、有機態窒素濃度については、斜面上部で有機態炭素濃度が高かったのに対し、有機態窒素濃度は斜面上の位置で大きな差はみられなかった。斜面上部では、下部に較べ有機物層中でC/N比の高い微小有機物が大量に生産され、降雨により鉱質土壌へ供給されていると考えられる。このことから、斜面上部の有機物層および土壌では総不動化が大きく、斜面下部では総不動化にリミットが生じて硝化が促進されやすい環境条件にあることが示唆された。また生態系内で硝化抑制に働く阻害物質は可動性が高い、すなわち土壌溶液中に溶けやすいほどその活性が高いと考えられる⁹⁾。そのため調査地の斜面上部では、有機物層や土壌において腐植などの分解産物が硝化抑制にはたらいっていることも考えられる。

有機物層からの養分供給量の推定

Table. 2 に調査地の降水量（林外雨量）から以下の算式により算出した、有機物層から鉱質土層へ供給されたと考えられる養分量概算値を示す。

各養分供給量概算値 = 林外雨量 × 有機物層通過溶液中の各養分濃度

有機物層通過溶液の量は実際には蒸発・植物による蒸散等により林外雨量より少なくなるため、この概算値は実際の値を過大評価していると思われる。しかし、養分吸収量（斜面上部；Nで26.0, Kで35.6, Caで45.3, Mgで6.5, 斜面下部；Nで60.0, Kで52.0, Caで75.7, Mgで11.0, 単位はそれぞれ $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）⁶⁾ と比較すると、吸収量に匹敵するほどの養分が有機物層から鉱質土層へ供給されていたと考えられる。今回の実験は有機物層通過溶液採取にあたり、有機物層に存在していた根系を取り除いて調査を行った。しかし実際には斜面上部のOe+Oa層の厚い有機物層では細根が多くみられ、層内で生成された養分はその多くが植物により吸収されていることが考えられる。一方斜面下部では、無機態窒素をはじめとする養分は有機物層通過溶液中に含まれて鉱質土層へ供給されている様子はみられなかった。一般に斜面下部の適潤性で有機物の分解の速いところでは有機物の浸透が深くまで進み、鉱質土層中の炭素や養分諸元素の量が多い傾向をもつ¹⁵⁾。おそらく斜面下部では、有機物はおもに有機物層で細分化されたのち、鉱質土層で植物に供給されていることが考えられる。このことから、森林生態系の養分循環において、Oe+Oa層の厚く堆積する斜面上部ほど有機物層が、斜面下部ほど有機物層下の土壌が植物にとっての養分供給の場として重要になると考えられる。

Table. 2 Elemental amounts of organic horizon leachate ($\text{kg ha}^{-1} \text{ 5month}^{-1}$)

	ridge	bottom
$\text{NH}_4\text{-N}$	22.0	2.3
$\text{NO}_3\text{-N}$	10.2	4.3
K	31.2	4.9
Ca	24.7	14.6
Mg	7.5	4.3
Cl	52.7	55.0
SO_4	52.8	28.9
Na	13.9	10.7
organic-C	263.3	71.8
organic-N	34.4	10.9

ま と め

- ・無機態窒素のプールサイズや窒素無機化速度は、有機物層の中でもOi層よりもOe+Oa層で高い値を示し、無機態窒素のプールサイズや硝化速度については斜面下方のOe+Oa層ほど高い傾向にあった。

- ・Oe+Oa層の厚い斜面上部では、降水の有機物層通過に伴い H^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , unmesured anion, 有機態炭素濃度の上昇がみられ、有機物層において植物による年間吸収量に匹敵するほどの養分と腐植酸が水に溶存することが示唆された。

- ・有機物層における溶存態養分の供給能は、おもにOe+Oa層の厚さ・水分および養分の保持能力、窒素無機化特性などに依存していると考えられた。

謝 辞

本研究を実施するに当たって京都大学農学研究科森林生態学研究室の岩坪五郎名誉教授、武田博清教授、川口英之博士をはじめ同研究室の皆様には貴重なご助言、ご協力をいただいた。皆様に重ねて御礼申し上げる。

引用文献

- 1) Haynes R. J. (1986) Mineral nitrogen in the plant-soil system. Academic press, Inc. pp. 72
- 2) Schlesinger W. H. (1991) Biogeochemistry : An analysis of global change. Academic press, Inc. pp. 169
- 3) McColl J. G. (1972) Dynamics of ion transport during moisture flow from a Douglas-fir forest floor. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **36**. 668-674
- 4) Jørgensen J. R., Wells C. G. and Metz L. M. (1980) Nutrient changes in decomposing loblolly pine forest floor. Soil. Sci. Soc. Amer. Jour. **44**. 1307-1314
- 5) Huttel R. F. and Schaaf W. (1995) Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. Plant and Soil. **168-169**. 31-41
- 6) 堤利夫 (1987) 森林の物質循環. 東京大学出版会. pp. 8, 59
- 7) 植物栄養実験法編集委員会 (1990) 植物栄養実験法. 博友社. pp. 175
- 8) 吉田和真 (1993) 森林生態系における斜面系列での窒素無機化特性. 京都大学卒業論文.
- 9) Killham K. (1994) Soil ecology. Cambridge University Press. pp. 114, 129
- 10) Hart S. C., Nason G. E., Myrold D. D. and Perry D. A. (1994) Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest. Ecology. **75**(4). 880-891
- 11) Cook B. D. and Allan D. L. (1992) Dissolved organic carbon in old field soils : Total amounts as a measure of available resources for soil mineralization. Soil Biology and Biochemistry. **24**(6). 585-594
- 12) Haruta Y. and Nioh I. (1992) Input and output flux of carbon and nitrogen in decomposing leaf litter of Japanese cedar. Soil Society and Plant Nutrition. **38**(4). 681-688
- 13) Paul E. A. and Clark F. E. (1989) Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, Inc. pp. 110
- 14) 徳地直子, 黒田幸夫, 岩坪五郎 (1991) 森林生態系における溶存物質濃度・量の垂直的変化 (I) 塩化物イオンとナトリウムイオンと土壤水の垂直的移動. 日本林学会誌. **73**. 135-144
- 15) 片桐成夫 (1989) 物質の集積・分解の場としての土壌. 堤利夫編, 森林生態学. 朝倉書店. pp. 110

Résumé

Evaluation of the forest floor for nutrient cycling was done by studying the distribution, inorganic N pool size, characteristics of N mineralization and the amount of nutrient through the forest floor. Results showed that the forest floor accumulated thicker in the upper part of the slope than the lower part of the slope. The difference was mainly caused by Oe+Oa horizon. It had larger inorganic N pool compared to Oi horizon, because Oe+Oa horizon had higher humus and water content that affected the storage of inorganic N. Net N mineralization rate via incubation was also larger in Oe+Oa horizon than Oi horizon. Nitrate was dominated at the lower part of the slope. The organic C content seemed to control inorganic N form, but there was no significant difference between extractable organic C content and nitrate pool size. At the ridge site, $\text{NH}_4\text{-N}$, Ca and K concentrations in the forest floor leachate increased. The nutrient amount in the forest floor leachate for 5 months was 32.2 kg of N ha^{-1} , 24.7 kg of Ca ha^{-1} and 31.2 kg of K ha^{-1} . It was enough for annual plant uptake. In the bottom site, no distinct increase in nutrients concentrations was noted.