

森林表層土壌における無機態窒素の動態とカチオン濃度の対応

—土壌水分条件を考慮するライシメータ実験—

中西 麻美・徳地 直子・大手 信人

Dynamics of inorganic nitrogen and accompanying cation in a surface layer of forest soils.
—An *in situ* lysimeter experiment taking soil moisture condition into consideration—

Asami NAKANISHI, Naoko TOKUCHI and Nobuhito Ohte

要 旨

土壌水分条件の違いが、森林表層土壌における無機態窒素の動態に及ぼす影響を明らかにするために、森林流域内でライシメータ実験を行った。実験には、直径20.2cm、長さ30cmのパイプに非攪乱土壌を充填した土壌カラムを用いた。森林流域内に多様に分布する土壌水分条件を考慮し、土壌カラム底部の平均圧力水頭を -20.7kPa 、 -6.7kPa 、 0kPa 、 2.0kPa に制御することで土壌水分条件を4段階に分けた。採水試料は、4種のライシメータからの流出水と、土壌水分条件を制御するために吸引した土壌深度10、20、30cmからの土壌溶液とした。土壌水分条件に関わらず、無機化および硝化は土壌表層で起きていることが確認された。無機態窒素の濃度および負荷量は、土壌水分条件により明らかに異なった。飽和条件下では無機化は進むが、硝化は抑制され、さらに脱窒が起きている可能性も示唆された。 -20.7kPa 、 -6.7kPa で土壌溶液を吸引した条件下では高い硝化活性を示したが、吸引圧によって NO_3^- 濃度および NO_3^- -N負荷量に違いが生じ、水分条件の違いにより硝化活性が異なることが明らかとなった。また、硝化活性が最も大きくなる土壌水分条件は、特定の範囲内にあることが示唆された。

1. は じ め に

森林流域における窒素の動態については、同一斜面の上部と下部で土壌の窒素無機化特性、硝化速度が異なることが知られており、地温、水分条件などがその要因としてあげられている^{1) 2)}。土壌水分条件などの違いは流域内部の不均一性から生じるために、地形、斜面上の位置によって異なる物質循環機構が存在していると言える。そこで、窒素の動態を明らかにするために、斜面位置の違いを反映している土壌水分条件の違いに着目して実際の流域内でライシメータ実験を行った。

ライシメータ実験は、根系を切断するなどの欠点があるものの、ライシメータ内にインプットされた林内雨の量を把握できるとともに、根による水分と養分物質の吸収がないために、土壌表層から下層への物質の物理的な動きについて把握できるという利点がある。また加工が容易で、土壌深度、水分などの条件設定をコントロールしやすい。したがって、土壌水分条件の設定が可能で、土壌中における物質の動態を把握するためには、ライシメータ実験が適当であると考えた。

Ohte et al.³⁾によって桐生流域で行われたライシメータ実験では、3段階に設定した土壌水分条件により、30cmの土壌カラムを通過した流出水に含まれる無機態窒素の質と量が異なり、またカラ

ム底部30cmで吸引採水した土壌溶液についても、同一カラムからの流出水との質的な違いが認められている。しかし、窒素の動態の主要な場である、より表層部での物質の動態については、採水試料が30cm土壌溶液と土壌カラムからの流出水に限られるために把握しきれていない。そこで、Ohte et al.³⁾の実験を元にして、土壌表層における物質の動態をより詳細に知ることに力点を置いた新たなシステムを考案した。土壌水分条件は、流域内の斜面および土壌の不均一性を考慮して、4段階の水分条件を設定した。土壌カラムの長さは30cmとし、流出水と30cm深度の土壌溶液に加え、10cm、20cmにおける土壌溶液についても新たに分析対象とした。なお、10cmと20cmの深度で土壌溶液を吸引採水することの影響が出ることも予想されるが、表層での窒素の動態を把握するためには、表層部での土壌溶液の採水は不可欠であると考えた。

したがって、森林表層土壌における無機態窒素の動態に土壌水分条件が及ぼす影響を、 NH_4^+ 、 NO_3^- の濃度および物質負荷量の経時変動から報告する。

2. 方 法

2.1 試験地の概要

実験は、滋賀県南部に位置する桐生試験地(5.99ha)でおこなった。試験地は北緯 $34^\circ 58'$ 、東経 $136^\circ 00'$ に位置しており、標高は190~255mである。植生は40年生のアカマツ、ヒノキの混交林であるが、近年マツ枯れによるアカマツの枯死が目立っている。樹冠はほぼ閉鎖している。年平均気温は 12.6°C で、1972~1981年の10年間の年平均降水量、年蒸発散量および年流出量はそれぞれ1671.8mm、740.2mm、936.0mmである⁴⁾。基岩は風化花崗岩からなる。

ライシメータ実験は桐生試験地内源頭部の小流域の斜面部で行った。この小流域の植生はヒノキで、下層植生にはヒサカキが見られる。

2.2 ライシメータへの土壌の充填

実験に用いたライシメータを図1に示す。設置の際、直径20.2cmの塩化ビニル製パイプに同径のエッジを取り付け、周囲の根を注意深く切りながら土壌に挿入し、円筒部分に非攪乱の土壌を充填した。土壌を充填した円筒はいったん取り出してエッジを外してから、底部にステンレス製ネットと受け皿を付けた後、元の位置に埋め戻した。円筒内の土壌深度は30cmとした。それぞれの水分条件ごとに、くり返し数は3とした。設置後はリターフォールなども取り除かず放置した。

2.3 実験システムと各ライシメータにおける土壌水分条件

定常状態における圧力水頭の鉛直分布は、鉛直方向への水の浸透が完了し、その後、土壌表面からの蒸発がないと仮定したとき、以下の式で表される。

$$\psi(Z) = -Z + \psi(Z_0)$$

ここで、 $\psi(Z)$ はライシメータ内の土壌カラム

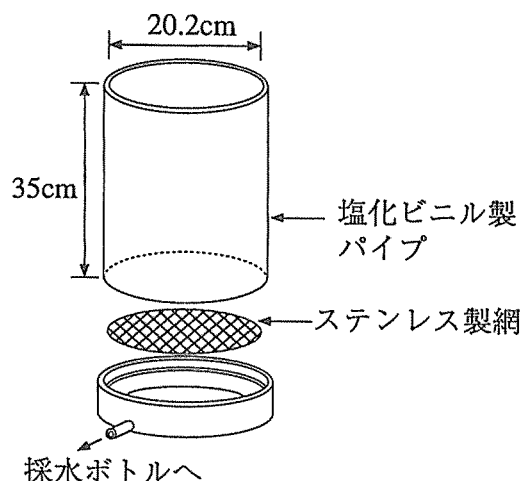


図1 テンションフリーライシメータ

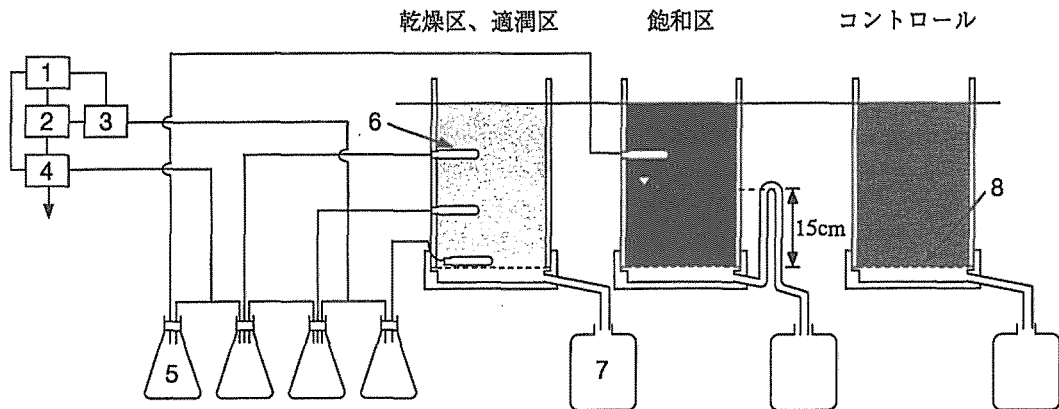


図2 実験システム

1. 電源 2. リレー 3. 圧力ゲージ 4. エアポンプ 5. 土壌溶液採水ピン
6. ポーラスカップ 7. 流出水採水ボトル 8. ステンレスネット

の底部 Z_0 からの高さ Z における圧力水頭を示す。

図2にライシメータ実験のシステムを示す。異なる4タイプの土壌水分条件を設定するために、それぞれのライシメータの圧力水頭および採水条件等は以下の通りとした。

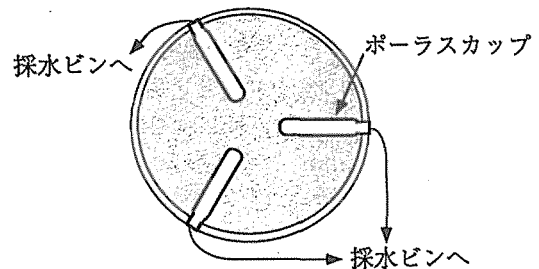
(1)コントロール；ライシメータ内の土壌水分条件をポンプによる吸引などに変えることなく自然の状態とした。 $\psi(Z_0)$ は0kPaである。ライシメータ内を通過した流出水のみを採水した。以下、このライシメータをコントロールとする。

(2)水分条件Ⅰ；水分条件は、エアポンプと圧力ゲージ、10cm、20cm、30cmの各土壌深度に図3のように埋め込んだポーラスカップを用いて、土壌溶液の吸引圧力を20.7kPaに維持することで制御した。すなわち圧力水頭が-20.7kPaを上回ると、圧力ゲージからリレーを通じてエアポンプを作動させ、-20.7kPaに戻るまで過剰な土壌水分がポーラスカップを通して採水ピンに吸引される仕組みである。 $\psi(Z_0)$ は-20.7kPaである。-20.7kPaは、圃場容水量の範囲よりも土壌水分が少ない条件となるので、以下このライシメータを乾燥区とする。

(3)水分条件Ⅱ；水分条件Ⅰの乾燥区と同様に、ポーラスカップ、エアポンプおよび圧力ゲージを用いて水分条件を制御した。土壌溶液の吸引圧力は6.7kPaとし、土壌深度10cm、20cm、30cmで土壌溶液を吸引、採水した。 $\psi(Z_0)$ は-6.7kPaである。-6.7kPaは圃場容水量の範囲内の水分条件であるので、以下このライシメータを適潤区とする。

(4)飽和条件；ライシメータの排水口を底部から15cmの高さまで引き上げて、円筒内土壌15~30cmまでの水分を飽和状態とした。 $\psi(Z_0)$ は2.0kPaである。なお、土壌深度10cmにおいて、水分条件Ⅱの適潤区と同様のシステムにより土壌溶液を6.7kPaで吸引した。深度20cm、30cmでの土壌溶液の採水は行わなかった。以下、このライシメータを飽和区とする。

大手・鈴木⁵⁾での含水量と圧力水頭との関係から、定常状態における各ライシメータの土壌深度

図3 ライシメータ断面図
(土壌溶液吸引部分)

と体積含水率の関係は図4のようになる。また、Kosugi⁶⁾での水分保持関数を用いて算出した4タイプの土壤カラム内の水分保持量は、コントロールが74.1mm, 乾燥区が28.9mm, 適潤区が39.1mm, 飽和区が97.5mmとなった。ただし、コントロール以外のライシメータにおいて、ポーラスカップ間の圧力水頭値の厳密な算定には不飽和浸透計算が要求されるが、ここでは両者間の平均的な値を概算値とした。

2.4 採水および分析方法

採水した試料の種類は、ライシメータごとに、以下の通りである。

コントロール：流出水

乾燥区：流出水, 土壤溶液(10cm),
土壤溶液(20cm), 土壤溶液(30cm)

適潤区：流出水, 土壤溶液(10cm),
土壤溶液(20cm), 土壤溶液(30cm)

飽和区：流出水, 土壤溶液(10cm)

林内雨は直径18cmのポリエチレン製ロートをとりつけたポリエチレン製ボトルを用いて採取した。

採水試料は、メスシリンダーで水量を測定し、ポリエチレン製ボトルに入れて実験室に持ち帰った後、直ちにpHと電気伝導度(EC)の測定をおこなった。 Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の各イオンをイオンクロマトグラフィー(島津製作所製、LC-10A)を用いて分析した。なお、本報告では、無機態窒素の動態に着目し、 NH_4^+ , NO_3^- の結果と、 NO_3^- と強い相関を示した Ca^{2+} , および生物的に不活性で物理的な水移動の指標となる Cl^- の結果について報告する。結果は全て算術平均値で表した。

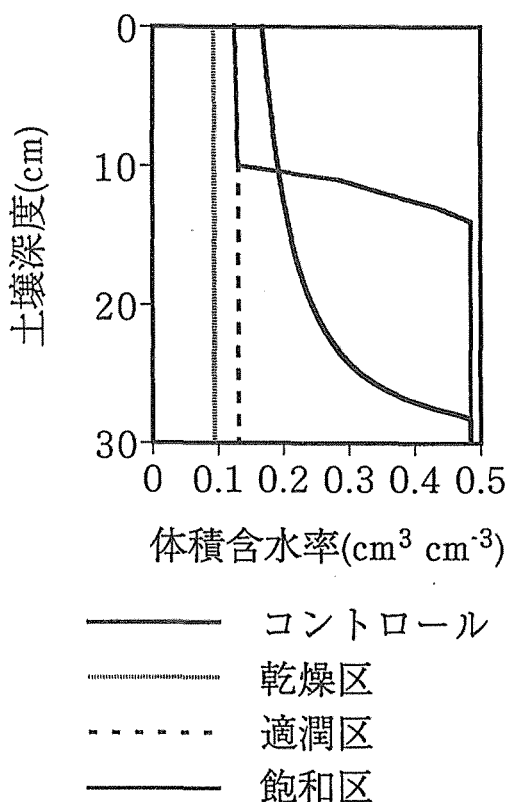


図4 各ライシメータ内の定常状態における水分プロファイル

表1 各ライシメータの水収支 (mm)

	コントロール	乾燥区	適潤区	飽和区
林内雨	248.0			
貯留水量(a)	74.1	28.9	39.1	97.5
流出水(b)	185.0	28.8	36.5	100.0
土壤溶液10cm(c)	—	48.8	36.7	120.3
20cm(d)	—	73.9	25.8	—
30cm(e)	—	81.4	129.6	—
アウトプット(b+c+d+e)	185.0	232.9	228.6	220.3
合計(a+b+c+d+e)	259.1	261.8	267.7	317.8

観測は1996年10月12日から開始し、1997年6月現在も継続中であるが、本報告では観測開始から1997年2月12日までの5ヶ月間の結果について扱う。採水は、一定量の採水を確保するために、降雨の状況に応じて数日～1ヶ月の間隔でおこなった。なお、適潤区と飽和区の土壤溶液について、実験開始直後は、吸引中にシステム内の空気もれで吸引圧力の維持ができなかったために採水できない場合があり、土壤深度によっては欠測値がある。

3. 結 果

3.1 各ライシメータの水収支

表1に観測期間中における各ライシメータの水収支を示す。各ライシメータについて算出した、定常状態における保持水量も併記した。各ライシメータのアウトプットと、ライシメータごとに算出した保持水量との合計が、コントロール、乾燥区および適潤区のライシメータではほぼ一致した。これは各ライシメータへインプットされた林内雨量がほぼ同量であることを示す。飽和区では合計が他のライシメータより50～60mm多くなったが、貯留水量を過大評価している可能性がある。

林内雨量、各ライシメータの流出水量および土壤溶液量を図5に示す。縦軸は観測間隔の日数で採水量を割って算出した観測間隔ごとの平均水量を表しており、棒グラフの面積が観測間隔中の総採水量に相当する。飽和区では、実験の初期段階で他のライシメータと比べて、初期流出に遅れが見られた。これは、飽和区の排水口が底部から15cm引き上げられており、土壤深度15～30cmの土壤孔隙を飽和するために林内雨のインプットが用いられたことを示す。実験開始直後は、土壤溶液の吸引圧力を一定に維持できなかったために適潤区と飽和区では土壤溶液の採水ができず、流出水のみとなり、乾燥区においても、吸引圧力の維持が不完全であったために総採水量のうち流出水の割合が高くなった。一定圧力の維持が確保できた30日目以降は、適潤区、乾燥区では流出水量がゼロに

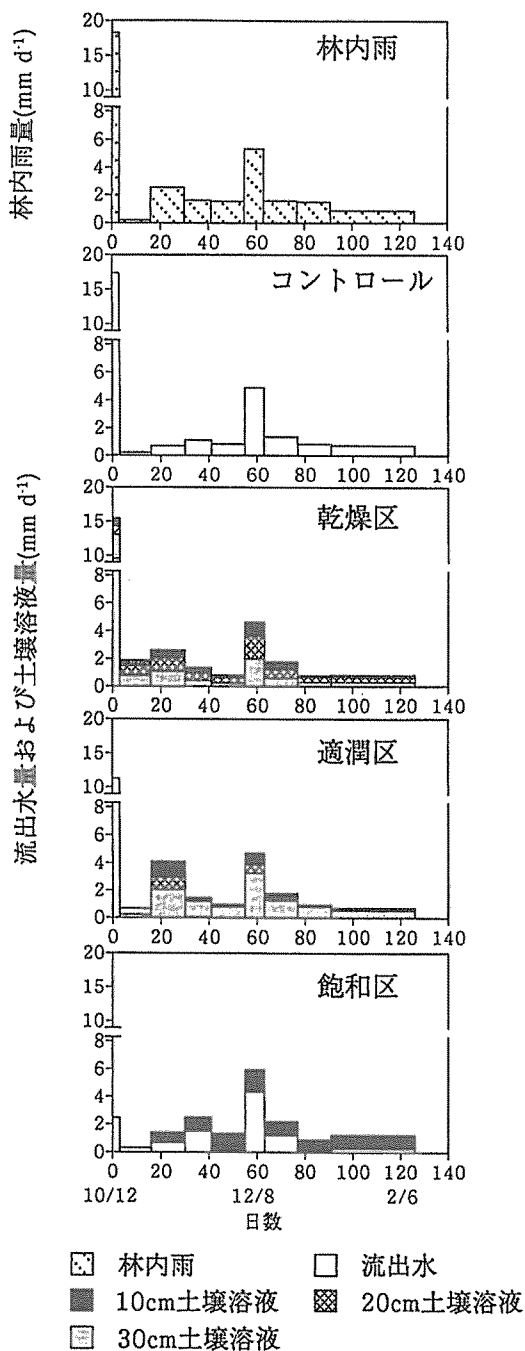


図5 林内雨量、流出水量および土壤溶液量の平均強度

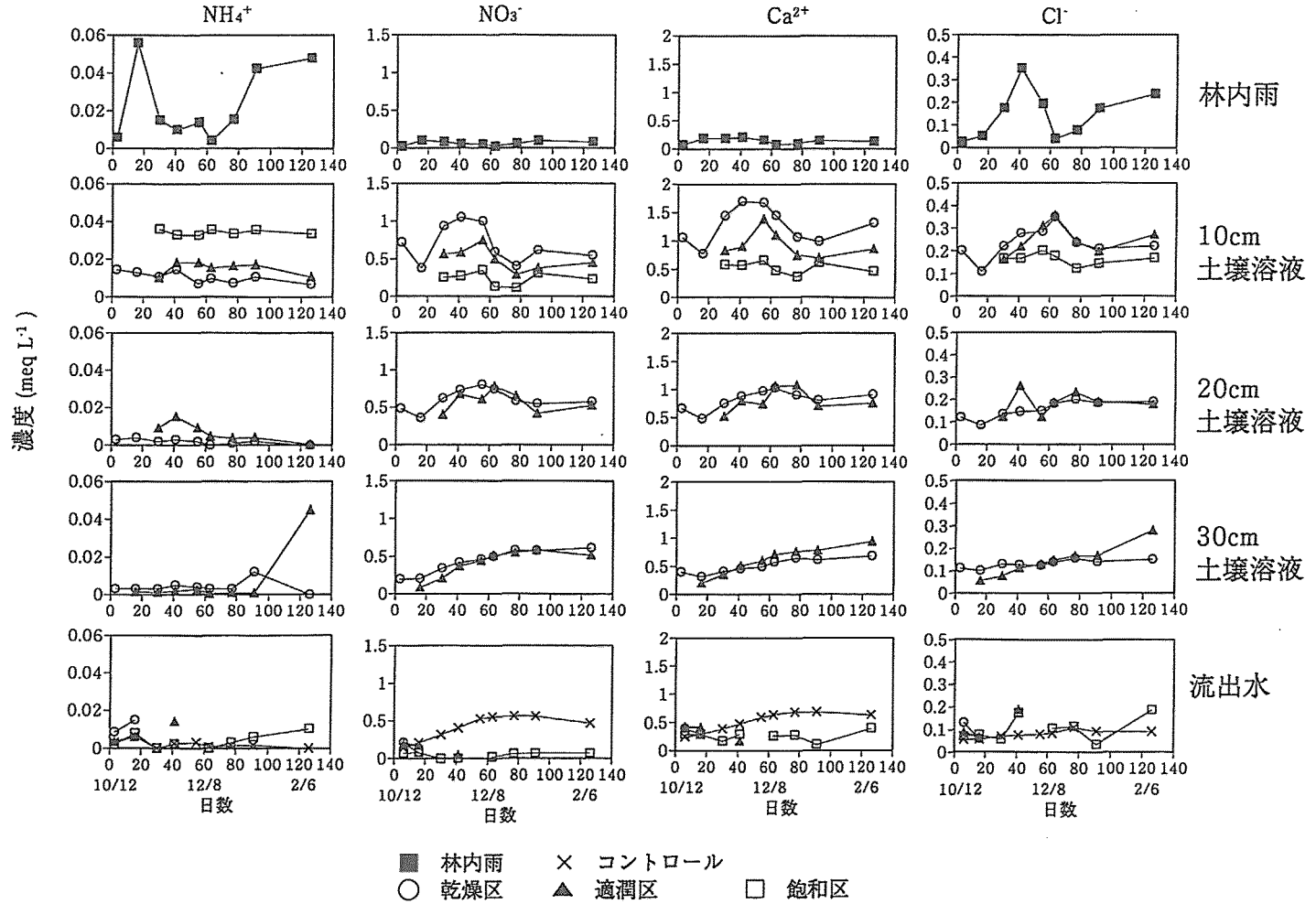


図6 土壌深度別にみたイオン濃度の経時変動

なった。

適潤区では、10cm、20cmの土壤溶液量が30cm土壤溶液量の20～30%であった。乾燥区では、30cmの土壤溶液量に対する10cm、20cmの土壤溶液量の割合がそれぞれ60%、90%となり、深度ごとに土壤溶液量の確保ができた。適潤区と乾燥区では、10cm、20cmで吸引した土壤溶液量の違いからも、異なる水分条件を設定できたと言える。

飽和区では、6.7kPaで吸引した10cmの土壤溶液量が120.3mmで、同じ吸引圧による適潤区の10cm土壤溶液量より多くなった。これは表層が適潤区よりも湿潤な状態にあるためと考えられる。したがって、コントロールを含めて4段階の土壤水分条件を設定できたことがわかる。

3.2 イオン濃度の変動

林内雨、各ライシメータにおける流出水および土壤溶液のイオン濃度の経時変動を図6に示す。 NH_4^+ は、実験開始から20日目までコントロール、乾燥区、適潤区、飽和区のいずれの流出水においても $0.01\sim 0.02\text{meq L}^{-1}$ であったが、30日目以降はコントロールと飽和区でも検出されない場合もあった。土壤溶液の NH_4^+ は、10cmでは飽和区が最も高く、順に適潤区、飽和区となり、湿潤な水分条件で高くなる傾向を示した。土壤溶液の20cm、30cmでは10cmと比べて低い値を示した。

NO_3^- は、乾燥区、適潤区の10cm土壤溶液で大きなピークが見られた。10cm土壤溶液における NO_3^- 濃度の平均値は乾燥区、適潤区、飽和区でそれぞれ 0.69meq L^{-1} 、 0.58meq L^{-1} 、 0.24meq L^{-1} と、湿潤な条件ほど濃度が低くなる傾向を示した。飽和区では硝化が抑制されたために、 NH_4^+ が消費されずに NO_3^- 濃度が低くなり、比較的土壤水分が低い乾燥区および適潤区では硝化が進行し、 NH_4^+ が消費されて NO_3^- 濃度が高くなったと考えられる。コントロールの流出水、乾燥区、適潤区の20cm、30cmの土壤溶液で30日目以降に濃度が上昇した。土壤溶液の20cmと30cmでは乾燥区と適潤区の差が小さくなった。また、飽和区の10cm土壤溶液では、 NO_3^- は $0.1\sim 0.4\text{meq L}^{-1}$ の範囲であったが、流出水では $0\sim 0.1\text{meq L}^{-1}$ と低くなった。

Ca^{2+} は、同じライシメータの同じ深度の土壤溶液で NO_3^- と非常によく似た変動を示した。 Ca^{2+} も NO_3^- と同様に、10cm土壤溶液では乾燥区>適潤区>飽和区の順に高い濃度を示し、 NH_4^+ とは逆の結果となった。土壤溶液中の NO_3^- 濃度と Ca^{2+} 濃度には強い相関があるという結果が報告されている⁷⁾。 Ca^{2+} 濃度と NO_3^- 濃度の相関係数 ($p<0.05$) は、飽和区の流出水をのぞく試料で0.80以上の高い相関を示した。

森林生態系外からもたらされ、土壤中で生成、溶脱および吸着のないとされる Cl^- についても、物質の物理的移動の面から着目した。林内雨で38日目に濃度のピークが見られたが、乾燥区と適潤区

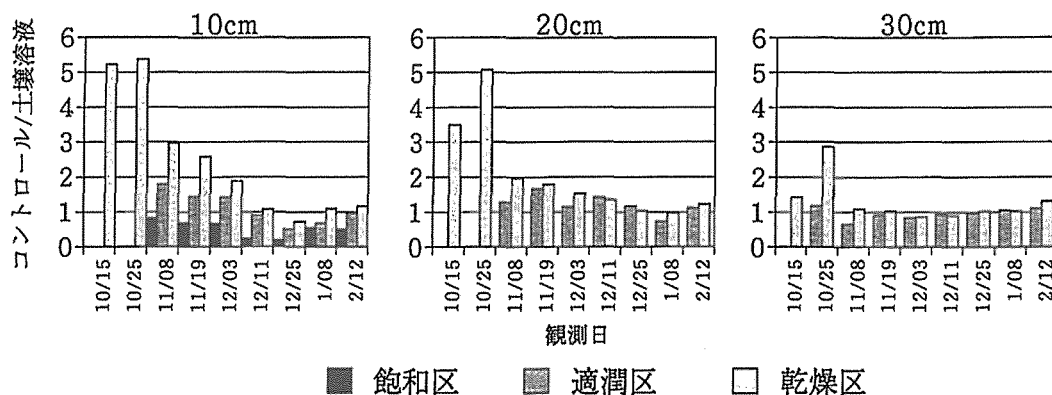


図7 土壤溶液とコントロールの流出水との NO_3^- 濃度の比

の10cmの土壤溶液では60日目にピークが認められた。ピークは、20cmでは74日目に、30cmでは100日目以降と下層ほど遅れて現れ、ピークの大きさも下層ほど小さくなった。したがってピークが伝わる速度はおおよそ 5.0mm d^{-1} と考えられる。桐生試験地における土壤間隙率は約50%であり⁴⁾、観測期間中(123日間)の総林内雨量が248mmであることから、土壤溶液の移動速度は 4.0mm d^{-1} で、 Cl^- の移動速度とほぼ一致した。 NO_3^- と Ca^{2+} については、林内雨では明瞭なピークは認められないが、乾燥区と適潤区の10cmで見られたピークが20cmで20日間、30cmで40日間遅れて出現しており、 Cl^- の移動速度と同じ結果になった。

土壤溶液中の NO_3^- 濃度とコントロールの流出水の NO_3^- 濃度比を図7に示す。横軸は観測日を表す。10cmで土壤水分条件による違いが明らかであった。10cmでは比が観測期間中を通じて乾燥区>適潤区>飽和区となり、設定条件の中では比較的乾燥した条件下で、より硝化活性が高くなった。

3.3 無機態窒素の累積負荷量

林内雨、各ライシメータにおける流出水および土壤溶液の無機態窒素の累積負荷量を図8に示す。

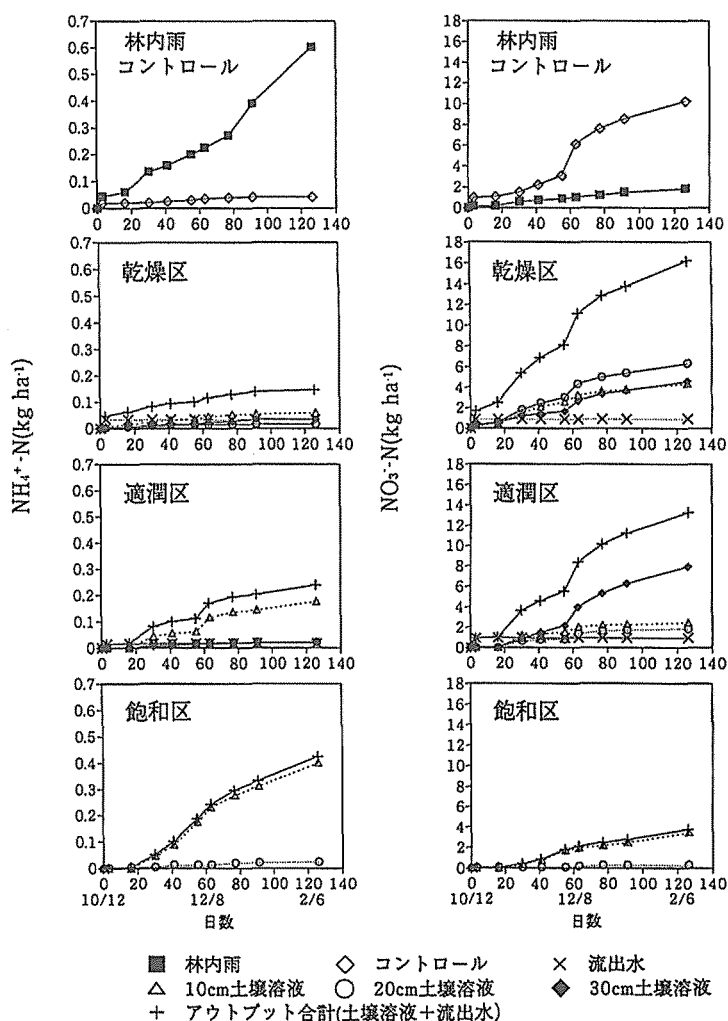


図8 無機態窒素の累積負荷量

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、高い濃度を示した適潤区の10cm、飽和区の10cmで増加の割合が大きくなった。乾燥区の3深度の土壤溶液と流出水、適潤区の20,30cmの土壤溶液では増加の割合は小さかった。乾燥区、適潤区では、流出水の採水が実験開始直後に限られたため、増加が見られたのは実験開始の初期のみであった。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ は、流出水ではコントロールで50日目以降に増加の割合が大きくなった。乾燥区、適潤区の土壤溶液については30日目以降に増加を示した。これはOhte et al.⁴⁾の結果と一致した。

ライシメータごとに、土壤溶液と流出水を合わせたアウトプットの合計について見てみると、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は飽和区>適潤区>乾燥区>コントロールとなり、濃度の場合と同様に湿潤な条件のライシメータで大きくなる傾向を示した。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は乾燥区>適潤区>コントロール>飽和区の順になり、土壤水分の少ないライシメータで NO_3^- のアウトプットが大きくなる傾向を示した。

4. 考 察

4.1 流出水と吸引採水した土壤溶液の性質

土壤水分条件を設定するために、各土壤深度で土壤水分の吸引を行ったが、吸引による水分の除去と同時に溶質の除去も行われている。したがって、水分条件に加えて、溶質を除去している影響についても考慮する必要がある。

この点については、Ohte et al.³⁾の実験においても、吸引した土壤溶液と流出水との比較がされている。吸引した土壤溶液と流出水の違いは、土壤カラム内の通過過程にある。流出水は、降雨イベント時にライシメータ底部の水分フラックスが吸引圧を上回る時に生じる比較的大きな孔隙を短時間で浸透した重力水であるのに対して、吸引した土壤溶液は土壤が不飽和な状態にあるときでも比較的小さな孔隙に存在している水分を吸引したものも含む。したがって、土壤孔隙中に保持されている時間が流出水では短く、土壤溶液では長くなり、保持時間の長さが NO_3^- 濃度の違いに反映される。Ohte et al.³⁾の実験結果でも、 NH_4^+ 濃度は大きな孔隙をすばやく通過した流出水で高く、 NO_3^- 濃度は土壤溶液で高い結果となっている。

本実験では、乾燥区と適潤区の流出水はない場合がほとんどであったので、流出水と土壤溶液の NH_4^+ 濃度と NO_3^- 濃度を比較することはできないが、土壤溶液の NO_3^- 濃度は乾燥区、適潤区ともに10cmで最も高く、20cm、30cmと下方で低くなり、30cmとコントロールの流出水はほぼ同じ値となっている。10cm、20cmでは、小さな孔隙中の動きの少ない土壤水分が吸引されており、コントロールの流出水より高い NO_3^- 濃度を示したことは、この影響が含まれていると考えられる。しかしながら、乾燥区、適潤区のマトリックポテンシャルは、適潤区で-6.7kPaと圃場容水量の範囲内にあり、水の状態は重力水および易有効水、乾燥区では-20.7kPaで圃場容水量の範囲には入らないが水の状態は易有効水である⁸⁾。したがって、乾燥区、適潤区ともに植物根が吸収できる範囲の水分条件であり、小孔隙中の水分を全て吸引するほどの圧力ではない。このことから、2つのライシメータに水分条件の差があるものの、採取された水の移動性、および小孔隙内で生じていると考えられる土壤溶液の濃度分布についても、採用した程度の吸引圧では大きな差があるとは言えない。したがって、上部10cm、20cmで土壤溶液を吸引することによる下方における水質形成への影響は小さいと考えられる。

4.2 土壤水分条件が無機態窒素の流出に及ぼす影響

4段階に設定した土壤水分条件により、流出水、土壤溶液の質および量に違いが見られた。 NH_4^+ 濃度は10cmの土壤水において、飽和区>適潤区>乾燥区の順に高くなったが、 NO_3^- は逆の順を示

し、比較的乾燥した条件ほど、 NO_3^- 濃度が高く、 NH_4^+ 濃度が低くなり、硝化活性が土壤水分条件に影響されていると考えられる。

NH_4^+ 濃度は林内雨でピークが見られたが、10cmの土壤溶液では乾燥区、適潤区、飽和区のいずれのライシメータでも、林内雨のピークに対応したピークは現れなかった。10cm土壤溶液の NH_4^+ 濃度は、ライシメータごとにほぼ一定の値で推移する傾向があり、また20cm、30cmでは10cmよりも低い値で変動することから、いずれのライシメータでも土壤表層10cmまでで窒素の無機化が起こり、同時に硝化によって NH_4^+ が消費されていると考えられる。いずれのライシメータでも、林内雨で投下された NH_4^+ のピークが深度10cmでその影響が見られないことから、硝化あるいは土壤への吸着による土壤溶液中の NH_4^+ のすばやい除去を示唆している。また、飽和区の10cm土壤溶液では NO_3^- 濃度が $0.12 \sim 0.35 \text{ meq L}^{-1}$ であったが、流出水では $0 \sim 0.07 \text{ meq L}^{-1}$ となり、脱窒が起きている可能性が示された。

NO_3^- 濃度は、林内雨では明瞭なピークは認められなかったが、10cmの土壤溶液でピークが見られた。このピークが現れた後、20cmでは20日目、30cmでは40日後とピークは下層に移動しており、20cm、30cmでは、その土壤深度で生じたと考えられる新たなピークは認められなかった。土壤深度別では、乾燥区、適潤区ともに10cmで最も高い濃度を示したが、20cm、30cmでは10cmと比べると濃度は低く、ライシメータによる差は小さくなった。以上のことから、硝化も主に土壤表層10cmまでで起きていることが確認された。

Ohte et al.³⁾の結果では、実験開始から25日目までは流出水、土壤溶液とも NH_4^+ 濃度が高かったが、20～50日目にかけて NO_3^- 濃度の上昇が見られた。本実験でも同様の結果が得られたが、Ohte et al.³⁾の結果のような明らかな違いは見られなかった。これは、実験の開始時期がOhte et al.³⁾は7月、本実験では10月であり、季節の違いによる生物活性の差が反映されたためと考えられる。

次に負荷量について見てみると、 NH_4^+ -Nは湿潤な条件ほど大きく、 NO_3^- -Nは水分条件が低いほど大きくなり、水分条件が各形態の負荷量にも違いを与えていることがわかる。Ohte et al.³⁾による実験結果から、26.9kPaで吸引した30cm土壤溶液と流出水の NO_3^- -Nの累積負荷量の和を、本実験におけるコントロールの流出水の NO_3^- -Nの累積負荷量と比較してみるとコントロールで高くなった。このことから、吸引圧を26.9kPaに設定した水分条件下では、コントロールに比較して硝化が抑制されていたと考えられる。そこで、コントロールの流出水の負荷量と、他のライシメータにおける流出水と土壤溶液の負荷量の和とを比較した。図9にコントロールと各ライシメータにおける NO_3^- -Nの累積負荷量総量の比を示す。飽和区、適潤区、乾燥区は、土壤溶液と流出水の負荷量の和を表す。26.9kPaは、Ohte et al.³⁾の結果を引用した。飽和区、26.9kPaでは比が1を下回り、適潤区、乾燥区では1より大きくなった。飽和区ではライシメータ内が15～30cmの飽和水帯であるために、表層0～15cmでも湿潤な条件となっており、硝化が抑制されたか、あるいは脱窒で除去されたと考えられる。硝化の最適含水率は、圃場容水量($\phi = -3 \sim -10 \text{ kPa}$)の60%とされている。適潤区ではマトリックポテンシャル ϕ が -6.7 kPa で圃場

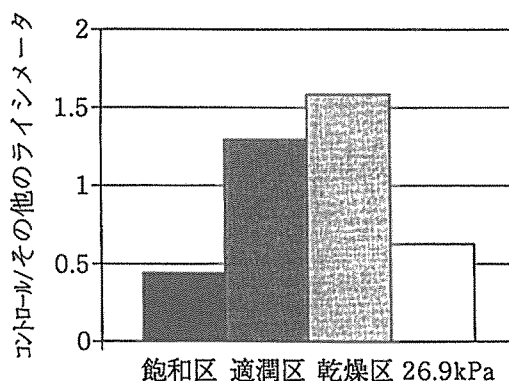


図9 各ライシメータとコントロールの
 NO_3^- -N累積負荷量の比
ライシメータの累積負荷量は流出水と
土壤溶液の負荷量の和
26.9kPaはOhte et al.³⁾の結果を引用

容水量の範囲内にあり、乾燥区では -20.7kPa であることから、 NO_3^- -N負荷量の比のピークが乾燥区と 26.9kPa のライシメータの間にあると推察される。

無機態窒素の濃度および負荷量が4種類のライシメータごとに異なったことは、土壤水分条件の設定がライシメータごとに4段階に分けられていた結果といえる。無機態窒素の動態において、土壤水分条件は重要な因子であることが確認された。

4.3 土壤中におけるイオンの濃度分布

飽和条件下の流出水以外の試料では NO_3^- と Ca^{2+} には高い相関があり、同じライシメータの同じ深度で同じ分布を示した。 NH_4^+ と Cl^- はそれぞれ異なる分布を示した。 NO_3^- と Ca^{2+} が高い相関を示す理由は、硝化により NO_3^- と同時に生成したプロトンが、 Ca^{2+} とイオン交換されて Ca^{2+} が放出されるというメカニズムによることが知られている。Nambu et al.⁹⁾は森林土壤中のプロトンの60%が硝化起源であると報告している。硝化により生成されたプロトンが、土壤中でのイオン交換、溶脱などを引き起こす役割を果たしていることが推察された。硝化に関与する物質の NH_4^+ は、土壤に吸着されたり、硝化により消費されるために、濃度が表層で高く、下層で低くなったといえる。

同一のライシメータでも、イオン濃度の経時変動の違いから土壤深度によって物質の濃度分布が異なり、物質によっては偏りのある分布を示すことが明らかになった。特に無機態窒素は土壤深度による濃度分布の違いが顕著であり、無機態窒素の動態が他のイオンの動きにも影響していることがわかった。

5. ま と め

森林流域の斜面位置における土壤水分条件を考慮したライシメータ実験により、土壤水分条件が窒素の循環に及ぼす影響について知見が得られた。土壤水分条件を4段階に設定したライシメータごとに、無機態窒素の濃度および負荷量、 Ca^{2+} の濃度に違いが見られた。これは、今回のライシメータ実験において、実際に土壤水分条件を段階別に分けることができたことを示すものであり、実験に用いたシステムが土壤水分条件の設定に対応できたと言える。土壤水分条件の違いにより、硝化活性に大きな違いが生じることが観測された。硝化は表層土壌10cmまでで卓越しており、硝化活性が最も大きくなる水分条件は、特定の範囲内にあることが示唆された。また、硝化に伴い Ca^{2+} など他のイオンの動態にも変化をもたらすことが明らかとなった。

今回の実験で用いたテンションフリーライシメータは、根系を切断してしまうために、植物による吸収が止まり、切断された根やリターフォールの分解が進行するなど、実際の流域における土壌とは異なる環境条件となる。が、今回の実験で土壤水分条件の設定を行えたことには意義がある。本実験の結果を流域内の斜面における実際の水分条件、硝化活性への解釈に用いるためには、自然斜面における土壌溶液の化学性のプロファイルなどの比較できるデータを収集する必要がある。この点については今後の検討課題である。

謝 辞

本研究の観測、実験に際し、山地保全学研究室、森林水文学研究室、森林生態学研究室の方々に協力していただいた。観測装置設置に際しては、西田顕郎氏、木庭啓介氏、稲垣善之氏、赤壁徹也氏、勝山正則氏、山本圭一氏にご尽力いただいた。記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 杵名重明・鈴木道代・仁王以智夫(1988): 同一斜面に植栽されたスギ林の土壌型の相違による窒素の無機化の硝化活性. 日林誌70(3), 127-130
- 2) 徳地直子(1996): 竜王森林試験地の斜面上の異なる位置における窒素循環機構. 京大演報, 68, 9-24
- 3) Ohte,N.,Tokuchi,N.,and Suzuki,M. (1997): An *in situ* lysimeter experiment on soil moisture influence on inorganic nitrogen discharge from forest soil. J.Hydrol. 195, 78-98
- 4) 福嶋義宏・鈴木雅一(1986): 山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10日連続日・時間記録への適用. 京大演報, 57, 162-185
- 5) 大手信人・鈴木雅一(1990): 森林土壌の土壌水分特性(Ⅱ) 大型土壌サンプルを用いる飽和・不飽和透水試験による体積含水率—圧力水頭関係の測定法とその適用. 日林誌, 72, 468-477
- 6) Kosugi,K.(1994): Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resour.Res. 30, 891-901
- 7) 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲(1993): 森林集水域での土壌から溪流への水質変化. 日林誌, 75, 389-397
- 8) 久馬一剛(1997): 最新土壌学. 朝倉書店, 216pp
- 9) Nambu,K.,Kunimatsu,T.,and Kyuma,K.(1994): Rate of soil acidification under different patterns of nitrogen mineralization.Soil Sci.Plant Nutr. 40(1), 95-106

Résumé

An *in situ* lysimeter experiment was carried out to examine the relationship between the soil moisture condition and dynamics of inorganic nitrogen in a forest catchment. The lysimeters were prepared by *in situ* undisturbed soil columns with PVC cylinders (inner diameter 20.2cm,length 30.0cm). Because of a variety of soil moisture conditions in a forest catchment, four soil moisture conditions were controlled by using an average pressure head at the bottom of each column at -20.7kPa , -6.7kPa , 0kPa and 2.0kPa . Samples were gravitationally drained from four lysimeters and soil solutions at 10cm,20cm and 30cm depths which were sucked to control soil moisture conditions. It was observed that nitrification and mineralization of nitrogen occurred in the upper soils in every lysimeters regardless of moisture conditions. The four soil moisture conditions caused significant differences in the concentration and budget of inorganic nitrogen. Under saturated condition, mineralization of nitrogen was observed in the upper 10cm layer of the soil column, but nitrification was limited. It suggested that denitrification occurred in the column under saturated condition. Under sucking soil solution at -20.7kPa and -6.7kPa , the concentration and budget of nitric acid were higher than two other columns. Nitrification activity tended to be higher under dry condition. Consequently it was clear that nitrification activity depended on the soil moisture condition. Moreover, it was suggested that at a specific range of soil moisture condition which nitrification activity was maximum.