

自然安定同位体比を用いた森林生態系における脱窒過程の検討

木庭 啓介・徳地 直子・岩坪 五郎・和田 英太郎

The use of stable nitrogen isotope method in the study on denitrification
in a forested ecosystem

Keisuke KOBAYASHI, Naoko TOKUCHI, Goro IWATSUBO and Eitaro WADA

要 旨

滋賀県大津市の桐生森林集水域試験地斜面下部において降水、土壤溶液、及び流出水を採水し、含まれる硝酸態窒素の濃度とその自然安定同位体比を測定した。降水が土壌に入り土壤溶液となる土壌層においては、硝化によって硝酸態窒素の濃度は増大した。さらに土壌層を浸透するにつれて、土壤溶液中の硝酸態窒素/塩素比の減少と同位体比 ($\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値) の増大が見られる場合と、硝酸態窒素/塩素比も $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値もほとんど変動しないまま流出していく場合があった。強い降水に伴って地下水位が上昇した時に前者の変動が見られたことから、脱窒は過湿になって嫌気的条件が整った時にのみ起きていることが明らかになった。さらに湧水と渓流水は、その $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値と硝酸態窒素/塩素比から、脱窒が起きた時と起きていない時にそれぞれ形成された地下水が、混合して形成されていることが示唆された。

はじめに

窒素は生物の必須元素であるが、生物体に利用可能な形態の窒素量には限りがあり、しばしば成長の制限要因となる。そのため森林生態系内における窒素循環の量的把握を正確に行うことは、森林生態系の機構の解明や森林の維持、管理にとってきわめて重要である。森林生態系の窒素収入は、窒素固定、降水、更に最近問題になっている酸性降下物としての収入によるものがあり、支出としては流出水にともなう流亡、脱窒、アンモニア揮散などがある。降水及び窒素固定による収入、渓流への流亡、窒素固定に関する研究に比べて、循環経路の最終の1つとしての脱窒の把握はまだ進んでおらず、野外での、特に森林での研究は少ない。その理由として

- 1: 脱窒の最終生成物である N_2 ガスを大気組成の78%を占める N_2 ガスと区別して測定することが困難であること。
- 2: 脱窒の中間生成物であり、脱窒の指標として用いられる N_2O が硝化でも生成されること。
- 3: 実験室内で脱窒の測定に有効なアセチレンブロック法を野外で適用する事が困難であること。

などがあげられる。

一方、微生物による脱窒において ^{14}N がわずかながら ^{15}N よりも優先的に脱窒され、その結果、同位体分別を起こすことが知られている。この現象を利用して、土壤溶液中の硝酸態窒素の $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 存在比を測定することにより生態系に攪乱をほとんど与えずに脱窒を把握することが可能である。

そこでこの研究では硝酸態窒素の安定同位体比の動きを調べることで森林生態系における脱窒の動態を調べた。日出平¹⁾により、桐生試験地斜面下部の土壤深度70cm層と湧水の出ている地点で、脱窒が起きている可能性が示唆された。しかし森林生態系内では脱窒は恒常的に起こっているのではなく、激しく雨が降った時に起こり、その後地下水位が下がるとすぐに起きなくなるという報告²⁾もある。今回は植物の生育期間を通じて連続的に土壤溶液を採水し、脱窒に不可欠な溶存硝酸態窒素並びにその自然同位体比の変化を調べるとともに、各採水地点の環境条件を調べ、脱窒に必要な条件を満たしているか確認を行った。

本研究を実施するに当たって京都大学農学部林学教室森林生態学研究室の武田博清助教授、川口英之助手をはじめ、同講座のみなさまには貴重なご助言、ご協力をいただいた。また京都大学理学部生態学研究センター同位体関係のみなさまには同位体生態学について貴重なご助言をいただき、さらに実際の同位体比の測定の際にはたいへんお世話になった。また、京都大学農学部国際林業論講座の山下多聞氏には実験、分析の仕方など研究を進めていく際の基本的な面について非常に貴重なご助言をいただいた。さらに、桐生試験地についてのデータ、及びご助言を同林学教室砂防学研究室のみなさまにいただいた。

以上のみなさまに重ねて御礼申し上げます。

試験地と採水地の設定および採水法

滋賀県琵琶湖東南部に位置する風化花崗岩を母岩とする滋賀県大津市桐生試験地（面積5.99ha、標高190～255 m、北緯34° 58′、東経136° 00′）の中にある小流域（マツ沢と仮称する）で調査を行った。現在では植林されたヒノキが優占しており、その吸収根は土壤深度30cmまでに約80%が分布していた。土壤溶液の水質変化から脱窒を確認するため、採水地は、集水域内での水の移動過程に沿う形で設定した（図1）。林外雨（図1中の①）、林内雨（同②）は林外と林内に設けた角形雨樋によりポリバケツに集めたものを採水した。土壤溶液については、マツ沢内斜面下部に4m×4mのプロットを用意し、土壤深度30cm層（同③）、50cm層（同④）、70cm層（同⑤）、100cm層（同⑥）の4点で採水した。30cm層の地点は地下水の不飽和域であるが、50、70cm層は

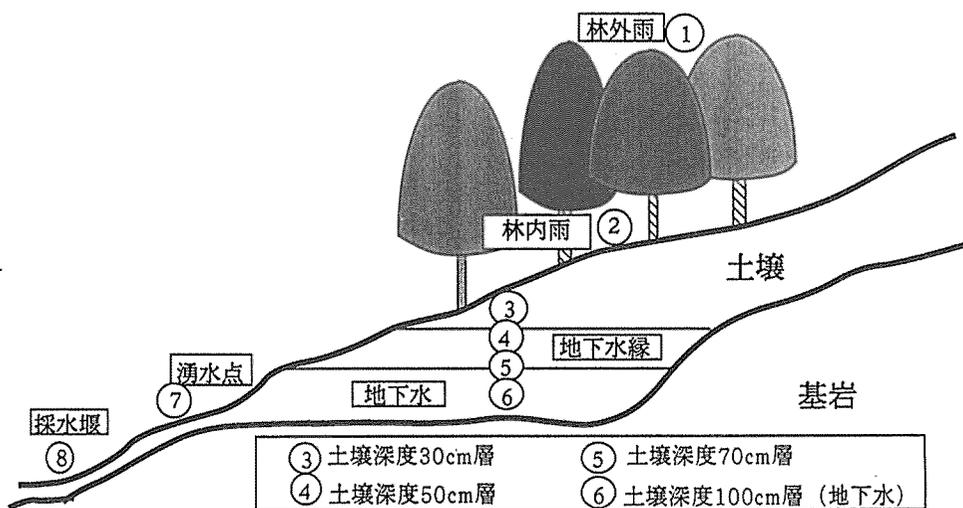


図1 採水地概要

飽和域になったり、不飽和域になったりする層で、地下水縁と呼ぶ。100cm層の地点は地下水飽和域であるので単に地下水層と呼ぶ。

土壌溶液の採水は以下のように行った。10本のテンションライシメーターを用意し、ハンドオーガーを用いて設定深度に合わせてプロット内にランダムに掘削した穴にそれらを1本ずつ設置した。10本をまとめて1つの採水ビンにつなぎ、ビンの中を電動ポンプで常に0.5気圧にまで減圧し、採水した(図2)。この装置1式を各深度に1つ、合計4つ設置した。なお電動ポンプは常に動かし、絶えず少しずつ採水する事により、採水と採水の間に土壌中で起きた作用過程をサンプルが反映するようにした。また、湧水(図1の⑦)については、プロットの脇にある、土壌が浅くなっている水が湧き出ている地点で採水日に採水した。湧水は10月まで見られた。渓流水(同⑧)は集水域下端の量水堰直前で採水日に採水した。ここでは期間を通して十分な水量があった。

採水期間は1993年5月7日から10月29日までであった。原則として月始めに採水することにしたが分析に必要な量が定期的には取れなかった。そのうち分析に十分な量を採水出来た期間は5月28日から9月14日であった。

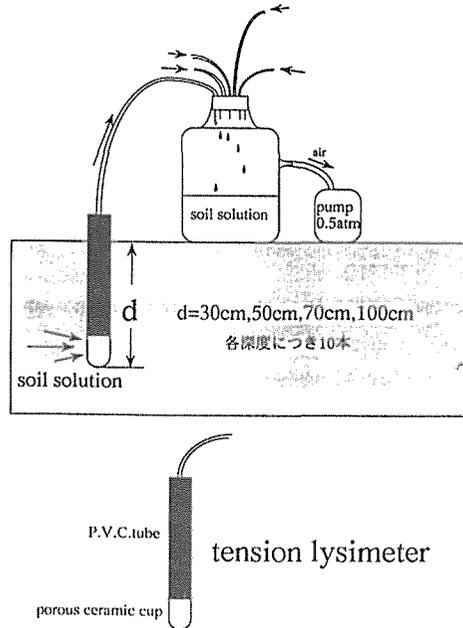


図2 採水装置

自然安定同位体比について

窒素には質量数の異なる二つの安定同位体¹⁴N, ¹⁵Nが存在し、物質によってその存在比(同位体組成, ¹⁵N/¹⁴N)はわずかだが変化する。ある物質の自然安定同位体比は標準物質の同位体組成との差異の程度によって表現され、次のように定義される

$$\delta^{15}\text{N 値} (\%) = \left\{ \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right\} \times 10^3$$

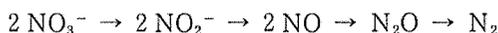
ここで $R = {}^{15}\text{N} / {}^{14}\text{N}$

大気中の窒素ガスの¹⁵Nは全窒素ガスの0.3663%でほぼ安定しているので、標準物質として用いられる。よって大気中の窒素に比べて同位体組成が大きい時、つまり、¹⁵Nが多い時には、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は正の値となり、小さい時には負の値となる。脱窒では¹⁴Nが選択的に消費されるので、土壌溶液中に残存する硝酸態窒素中の¹⁵Nの割合が増え、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値が増大する。それに加えて、硝酸態窒素濃度の減少がみられればその地点で脱窒が起こっていると考えられる。また硝化においては¹⁴Nが選択的に硝化されるので、生成された硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は減少し、濃度は増大する。

本研究では硝酸態窒素濃度と $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の変動についての考察に加え、求めた $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値からさらに同位体濃縮係数も求め、文献値との比較を行い脱窒の検討を行った。

脱窒について

脱窒とは微生物が窒素酸化物を呼吸系の電子伝達系の電子供与体として利用し、 N_2 、あるいは N_2O を生成する反応を指す。生物活性に関係なく化学的に起きる脱窒もあるがここでは生物によるものを扱う。脱窒の反応過程についてはいまだ不明な点があるが一般に次のように考えられている³⁾。



この反応を行う能力を持つ微生物を脱窒菌と呼ぶが、脱窒が起きるにはいくつかの条件が必要であり、その条件として

- 1：脱窒菌のエネルギー供給源となる物質（基質）が存在すること
- 2：脱窒菌にとって好適な温度、pH 条件が存在すること
- 3： NO_3^- （または NO_2^- ）が存在すること
- 4：嫌氣的条件であること

があげられる。脱窒の確認を行うため、桐生試験地にこれらの条件が揃っているかを検討した。

1 について

脱窒菌が脱窒において利用する基質は様々なものがある。たとえば炭水化物、有機酸、アミノ酸などの比較的利用しやすいものから、芳香族化合物さらには無機硫黄化合物や水素ガスまでが基質となる。本研究では、最も一般的であるとされている水溶性有機物を脱窒菌の基質として扱うこととする。

2 について

ほかの微生物活性と同様に脱窒速度は温度条件に大きく左右される。脱窒菌は普通 $30^{\circ}C$ 付近に最適温度を持つが、 $5^{\circ}C$ でも脱窒は進行した⁴⁾。谷ら⁵⁾によればこの試験地では5月から11月までの地温は土壌深度10cm層で $13.6\sim 22.3^{\circ}C$ 、30cm層で $12.7\sim 21.5^{\circ}C$ 、100cm層で $11.6\sim 19.4^{\circ}C$ であるので、脱窒を制限するほど低くはない。また最適 pH は一般に $7\sim 8$ とされており、酸性に弱く、pH 5 以下ではほとんど脱窒作用を営まない⁶⁾。

3 について

土壌溶液中では比較的硝酸態窒素濃度が高いのでそれが脱窒を制限することは少なく、本研究ではこの意味で硝酸態窒素濃度に対して考察を行うことはしない。

4 について

脱窒は低酸素濃度条件下で誘導され機能する。脱窒に必要な嫌氣的条件は溶存酸素濃度にして 0.12ppm 以下である⁷⁾。また、実験室内での研究では脱窒が起きるのには60%以上の含水率が必要だとされている⁸⁾。嫌氣的条件が進行するにつれ $NO_3^- \rightarrow N_2$ 、 $Mn^{4+} \rightarrow Mn^{2+}$ 、 $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ 、 $SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$ の順に還元反応がおこっていく⁸⁾。すなわち嫌氣的条件下の土壌溶液中では、まず硝酸が還元され、更に Mn^{4+} と Fe^{3+} が還元されて、陰イオンと共に溶解する。よって脱窒の起きる条件下では硝酸態窒素濃度の減少とともに、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} の濃度増加がみられる可能性がある。

分析項目及びその測定法について

脱窒の確認の指標として窒素安定同位体比を測定した。同位体の測定には数百 μg の窒素が必要であり、そのため土壌溶液（深度30, 50, 70cm層）は2 l、林外雨、林内雨、湧水、渓流水、地下水は4 lを採水した。それにKOHを加え、サンプル中の NH_4^+ を除去しながらロータリー

エバポレーターで約100 mlに濃縮し、デバルタ合金を加え、セミマイクロ・ケルダール蒸留によってNO₃⁻をNH₄⁺に還元蒸留して、硫酸溶液中に捕集した。さらにロータリーエバポレーターで約2 mlまで濃縮した後に、真空ライン中でKBrと反応させ、窒素ガスに変換した。この窒素ガスをフィニガンマツト製ガス質量分析計Delta Sに導入し、同位体比を測定した。測定精度は0.2%であった。さらにNO₃⁻-N、Cl⁻の濃度の分析を液体イオンクロマトグラフィー（島津製作所製 HIC-6 A）で求めた。総有機態炭素濃度は全有機炭素計（島津製作所 TOC-5000）を用いて不揮発有機態炭素測定法（NPOC法）で測定した。Mn、Fe濃度についてはICPプラズマ発光法（SEIKO Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer SPS 1500VR）で測定したが、これは全Mn、Fe濃度であり、数種類のイオン価のMn、Feが含まれている。土壤中のMnは2⁺、3⁺、4⁺であるが、3⁺、4⁺のMnは不溶化してしまうので土壤溶液中には存在せず、今回測定したMnはMn²⁺と考えてよい。Fe濃度は検出限界以下（0.01ppm）であった。pHは持ち帰ったサンプルをpHメーター（堀場製作所ATCpHメーターD-13）で測定した。また、先にあげた土壤中の嫌氣的条件の指標として、土壤溶液と湧水中の溶存酸素濃度を測定した。プロット内に各深度まで井戸を掘り、そこに溶存酸素計（堀場製作所DO-3）を入れ測定した。井戸には蓋をして各深度の空気がたまるようにし、井戸の中の空気が土壤大気となるようにした。なるべく土壤溶液中の酸素を測るようにしたが土壤大気しか測定できなかったものは、土壤溶液と平衡状態にあるとして、ヘンリー定数を用い、すべて溶液中の溶存酸素濃度として計算した⁹⁾。加えて、土壤中の水分条件の指標として、プロットのすぐ横にある最高水位計（G1）を用いて地下水位の変動を観察した。測定は採水時に行い、測定期間中の最高水位を記録した。

各測定項目の測定結果と考察

溶存有機態炭素については（図3）

どの地点、深度でも有機態炭素はかなりの濃度で常に存在した。よって有機態炭素濃度が脱窒の規定要因とは考えられない。日出平¹⁰⁾により指摘された湧水での有機態炭素濃度の極端な増大はみられなかった。

またpHについては（表1）、土壤溶液中ではほとんどpH6以上を保っていたので、脱窒を制限することは考えられない。

嫌氣的条件の指標として測定した溶存酸素については（表2）、30cm層（平均8.8ppm）>50cm層（4.3）>70cm層（1.3）>地下水層（1.29）となっていた。しかし、先に記した通り脱窒が起る溶存酸素濃度が0.12 ppm以下であることを考えると、十分に嫌氣的であるとは言えない。酸化還元状態の指

表1 pH

	May. 28 -Jun. 21	Jun. 21 -Jun. 25	Jun. 25 -Jul. 9	Jul. 9 -Aug. 5	Aug. 5 -Sep. 14
林外雨	5.81	5.88	4.51	5.71	5.44
林内雨	5.14	6.01	4.63	6.17	6.04
30cm層	6.38	6.23	6.62	*	6.45
50cm層	6.58	6.29	6.76	6.90	6.75
70cm層	6.84	6.13	6.78	7.34	6.89
地下水	6.45	6.64	6.80	6.13	6.12
湧水	6.07	6.49	5.85	6.15	6.07
渓流水	6.73	6.40	6.45	6.74	6.82

*はデータなし

表2 土壤溶液中の溶存酸素濃度 (ppm)

	May. 28 -Jun. 21	Jun. 21 -Jun. 25	Jun. 25 -Jul. 9	Jul. 9 -Aug. 5	Aug. 5 -Sep. 14
30cm層	10.0	10.0	10.1	8.5	5.4
50cm層	*	4.3	4.2	3.9	4.9
70cm層	1.7	0.8	0.6	1.1	2.2
地下水	*	*	*	1.6	0.8
湧水	*	5.1	5.8	8.7	8.8

*はデータなし

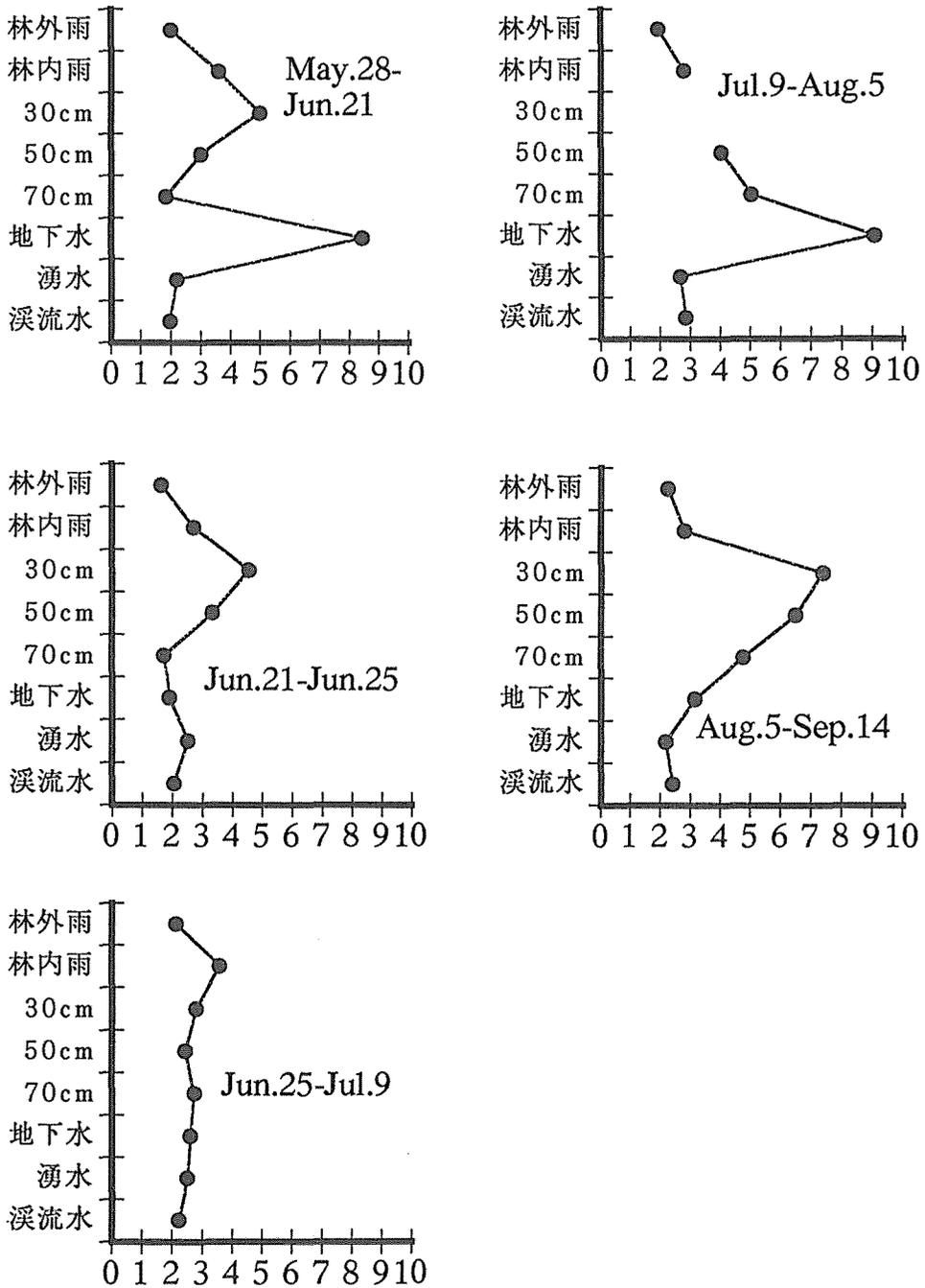


図3 溶存有機炭素濃度の変動 (ppm)

標として土壤溶液中の全 Mn 濃度を測定したが (図4), 硝酸態窒素濃度の高低に関係なく, 低濃度 (0.01~0.04ppm) で推移していた。よって土壤溶液中で硝酸態窒素は還元されることがあるが, Mn⁴⁺までは還元されないという状態, つまり, 脱窒が活発に起きる様な状態ではない事が示唆された。実際に脱窒が起きているならば, この測定では十分に把握できていない土壤中での

局所的な嫌気の状態が生じていると考えなければならない。

井戸の水位によって求められた最高地下水位の変動は(図5)梅雨時の5/28~6/21, 6/21~6/25に最高値をとった。このことから、この期間中は土壤含水率が高く、嫌気的条件が整う可能性があった。なお滋賀県気象月報9)からの降水のデータによると、5/28~6/21の34日間で降水量は138mm, 降水日数は9日, 6/19に63mmの大雨があった。6/21~6/25の5日間で降水量は89mm, 降水日数は3日, 6/23に83mmの大雨が降ったことから、強い降雨によって地下水位が上昇したと考えられる。

以上から、脱窒の起きていた可能性のある5/28~6/21と6/21~6/25の各期間における硝酸態窒素とその同位体比の変動について考察を進めることにする(図6-A)。

硝酸態窒素濃度と同位体比の変動について考察する際に、本研究では土壤溶液の下層への動きは速く、毎回採水した土壤溶液は前回採水日以前の性質を受け継ぐことなく、前回の採水日との間に新しく作られたものであると考える。ただし、各深度層に供給される溶液は、浸透した層での影響を受けつつ下層へと移動してゆくものとする。また、硝酸態窒素濃度の変動には希釈、濃縮、他の溶液との混合、硝化や脱窒、植物の吸収の影響が含まれているので、希釈と濃縮の影響を除去するために生物活性の影響を受けにくい塩素濃度で硝酸態窒素濃度を割り、その比をもって硝酸態窒素濃度の硝化、脱窒、混合、吸収による変化とする。

5/28~6/21(図6-Aの点線)では、林内雨から土壤深度30cm層に至る過程で、硝酸態窒素/塩素比は増大し、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は+0.24‰から-5.89‰へと減少した。ここでは、アンモニア態窒素の硝化にともない硝酸態窒素/塩素比の増大が起き、その生成された硝酸態窒素が低い $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値を持ったと考えられる。30cm層から、50cm, 70cm層では、硝酸態窒素/塩素比は減少し、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は-5.79‰から-2.35‰, +1.47‰へと増大しており、脱窒が起きていたと考えら

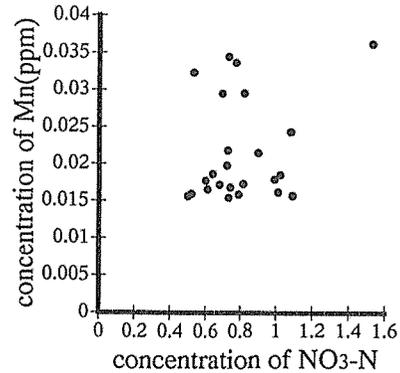


図4 土壤溶液中のMn濃度と硝酸態窒素濃度

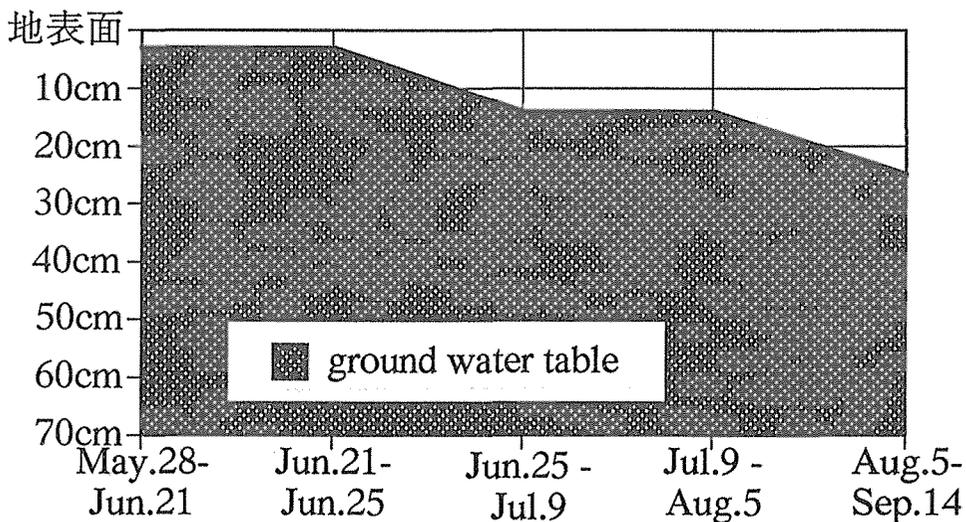


図5 地下水位の変動

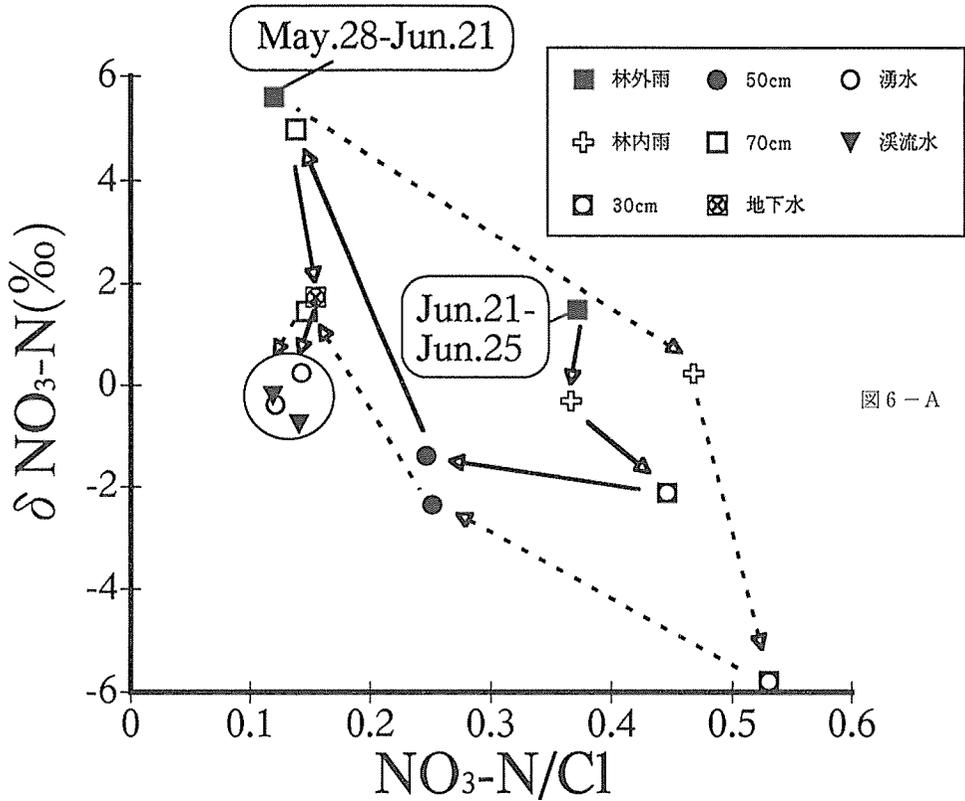


図6-A

5/28~6/21の地下水はデータなし

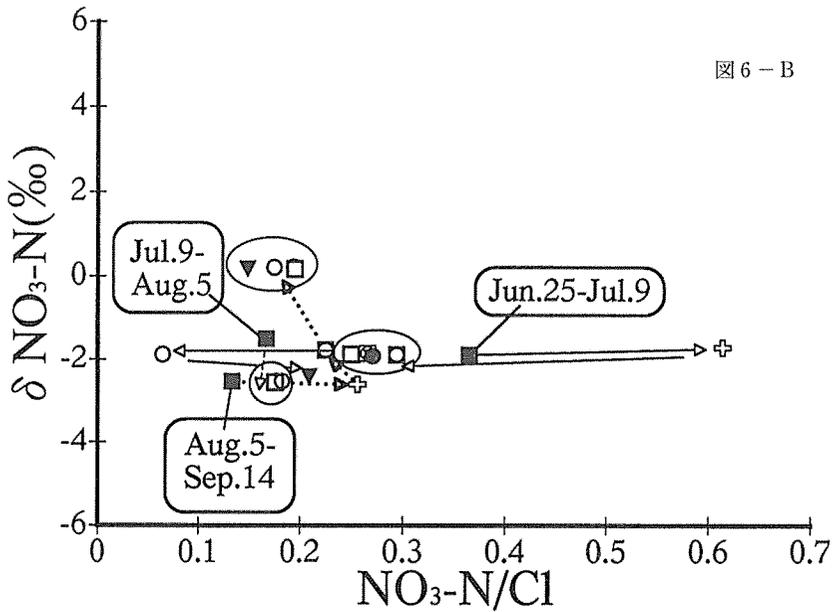


図6-B

7/9~8/5の林内雨, 30cm層, 地下水, 渓流水, 8/5~9/14の地下水はデータなし

図6 硝酸態窒素/塩素比と同位体比の変動

れる。地下水の同位体比は測定できなかつた。湧水にはいると $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の低い硝酸態窒素を含む水によって混合され $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は下がった。湧水と渓流水はほぼ同一の性質を示しており、渓流水に流れ着くまで何の作用過程も受けていなかった。

同様に6/21~25の結果では(図6-Aの実線)、土壌に入って30cm層では硝酸態窒素/塩素比が硝化により増大し、それにともない $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は減少した。そして、50, 70cm層と浸透するにつれ硝酸態窒素/塩素比は減少し、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は増大した。つまり30cm層から70cm層では脱窒が起きていたと考えられる。特に50cm層から70cm層への硝酸態窒素/塩素比の減少と $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の増大は顕著であつた。植物が硝酸態窒素を吸収する際には同位体効果は起きないので¹⁰⁾、30cm層から50cm層での変化における $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の変動に比べて硝酸態窒素/塩素比の変動が大きいのは植物による吸収が大きく影響した結果と考えられる。地下水層にはいると $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は減少した。この理由として、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の低い溶液との混合が示唆された。同様の混合を湧水も受けていたが、硝酸態窒素/塩素比が低く $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値も低い林内雨による混合の影響も含まれていると考えられる。渓流水は湧水の性質をそのまま受け継いでいた。このように嫌気的条件が整っている期間では土壌深度50, 70cm層で脱窒が起きていたことが分かつた。

その他の期間の測定結果について考察する。図6-Bにおいて、6/25~7/9, 7/9~8/5(林内雨, 30cm層, 地下水, 渓流水の同位体比は測定できなかつた)の期間では土壌中の各層で硝酸態窒素/塩素比と $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値共に変動がなく、硝酸態窒素は何の作用過程も経ずに流出していることがわかる。しかし8/5~9/14(図6-E)では、土壌中で30cm層から50cm層へと浸透するにつれて $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の増大がみられた。50cm層から湧水, 渓流水まで硝酸態窒素/塩素比, $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値ともにほぼ同じ性質を示した。硝酸態窒素/塩素比の変動は小さいが30cm層から50cm層で脱窒の可能性があり、50cm層より下層では50cm層の性質をそのまま流出するまで反映しており林内雨など他の溶液との混合による性質の変動はみられなかつた。

以上から、林内雨から渓流水までの水の移動にとまらぬ $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値, 硝酸態窒素/塩素比の変動と脱窒の有無についてまとめると、図7のように2つの傾向が考えられた。ただしここでは林内雨の性質を一定のものとして考察を進めている。

林内雨から土壌にはいる際には二つの場合が考えられた。植物による吸収が硝化を上回る場合は、植物の吸収による同位体効果は起これないので、硝酸態窒素/塩素比の減少に加え硝化による $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の減少が認められた。一方、硝化による供給の方が植物による吸収より大きい場合には、林内雨から30cm層へと移動する際に硝酸態窒素/塩素比は増大し、同時に硝化の際の同位体効果によって $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は減少した。

土壌中で脱窒が起きている時には、土壌深度30cm層から50cm, 70cm層へと土壌溶液が移動するにつれてその硝酸態窒素/塩素比は減少していき、 $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値は増大していった。特に50cm層から70cm層にかけては硝酸態窒素/塩素比に比べて $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の変動が大きく、脱窒が起きていることが示唆された。またそれに対し、30cm層から50cm層にかけては硝酸態窒素/塩素比の減少の大きさに比べて $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値の増大は小さいので、ここでみられた硝酸態窒素/塩素比の減少は、脱窒に加え、植物の吸収が大きく影響していると考えられる。脱窒が起きていない時には土壌深度30cm層での硝酸態窒素/塩素比と $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値をそのまま土壌深度50, 70cm層でも保持していた。地下水層については70cm層での性質をほぼ保持していたが、脱窒が起きている時には $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値が減少する事が多かつた。さらに、湧水と渓流水については、その硝酸態窒素/塩素比と $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ 値がちょうど脱窒が起きた時の70cm層での値と脱窒が起きていない時の土壌溶液の持つ値の中間にある事から、脱窒が起きた時に形成された地下水と起これない時に形成された地下水とが混合されて形成されている事が示唆された。この事は土壌溶液と、地下水

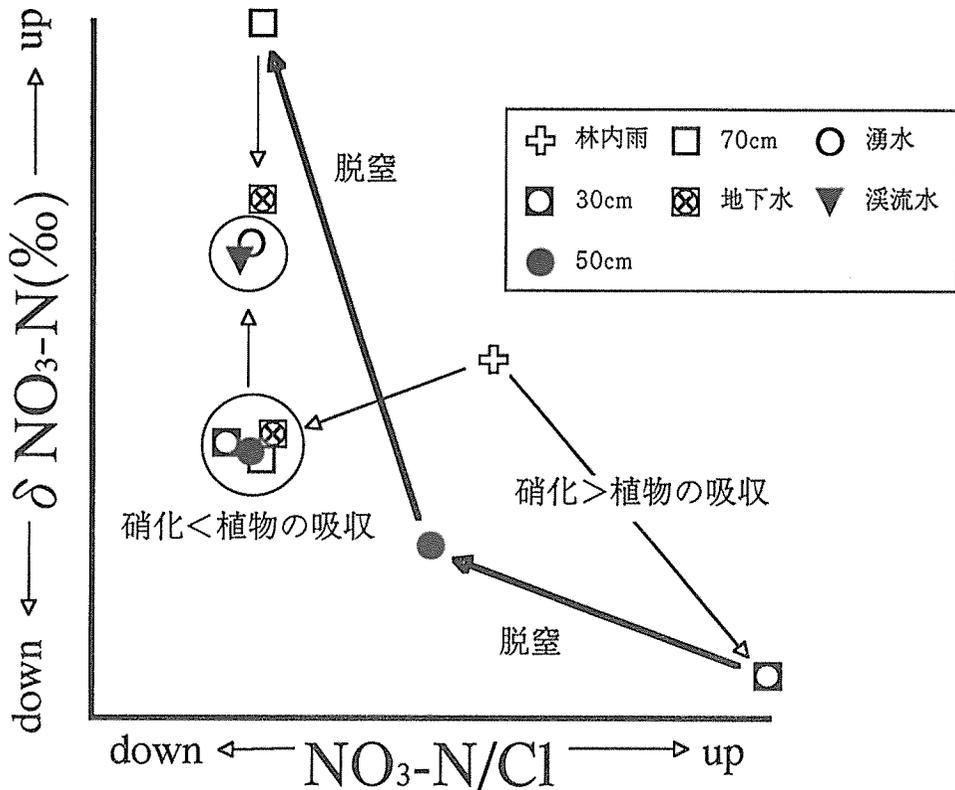


図7 脱窒による土壤溶液の性質変動のモデル

や湧水、渓流水の形成における時間的なズレの点からかんがえても妥当であると考えられる。

また、本研究での結果では8/5～9/14を除くと、脱窒が起きたときには植物の吸収を硝化が上回っていたので、硝酸態窒素が土壤溶液中に十分に存在したときのみ脱窒が起きていたと考える事も可能であると思われる。

脱窒は不可逆的の一次反応で、Open System（供給される硝酸濃度は一定）かつ定常状態で行われていると仮定し¹¹⁾、同位体濃縮係数を計算してみると¹²⁾、5月28日から6月21日までの期間での土壤深度50cm層で -4.62‰ 、70cm層で -5.66‰ 、6月21日から25日の期間での50cm層で -1.24‰ 、70cm層で -6.01‰ であった。脱窒の起きている時の同位体濃縮係数の文献値は地下水層で $-4.7\sim-5.0\text{‰}$ 、 -5.3‰ ¹²⁾、 $-7.8\pm 0.5\text{‰}$ ¹³⁾が報告されており本研究で得られた値もこれらに近いものであったので、脱窒が起こっていたと考えることは妥当であると考えられる。

ま と め

以上の考察から

- ・ 桐生試験地では脱窒は常に起きているのではなく、ある一定の条件（地下水水位が上昇する）が満たされた時のみ起きる。
- ・ 脱窒に必要な菌の基質、pH、地温、硝酸態窒素の条件は土壤中で満たされていた。嫌気的条件はマクロ的には満たされていないがミクロ的なレベルで満たされていると考えられた。
- ・ 条件が満たされた時、脱窒は土壤深度50cm層、70cm層で起きていることが確認された。

引用文献

- 1) 日出平洋一 (1993) 森林生態系における自然安定同位体を用いた窒素循環の把握について 京都大学農学部卒業論文
- 2) Tietema, A., Bouten, W. and Wartenbergh, P. E. (1991) Nitrous oxide dynamics in an oak-beech forest ecosystem in the Netherlands Forest Ecology and Management, **44**, 53-61
- 3) Payne, W. J. (1973) Reduction of Nitrogenous oxides by microorganisms Bact. Rev., **37**, 409-440
- 4) Stanford, G., Dzienia, S. and Pol, R. A. V. (1975) Effect of temperature on denitrification rates in soils Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **39**, 867-870
- 5) 谷 誠, 福嶋義宏, 鈴木雅一 (1979) 山地小流域内の地温年変化について 京都大学農学部演習林報告 **51**, 138-151
- 6) Bremner, J. M. and Shaw, K. (1958) Denitrification in soil J. Agric. Sci., **51**, 40-51
- 7) Greenwood D. J. (1962) Nitrification and nitrate dissimilation in soil Plant and Soil **17**, 365-389
- 8) 宗宮 功 (1990) 自然の浄化機構 技報堂出版 pp. 245
- 9) 滋賀県気象月報 平成 5 年 5 月-10 月 日本気象協会発行
- 10) Mariotti, A., Mariotti, F., Champigny, M. L., Amerger, N. and Moyse, A. (1982) Nitrogen isotope fractionation associated with nitrate reductase activity and uptake of NO_3^- by Pearl Millet Plant Physiology, **69**, 880-884
- 11) Miyake, Y. and Wada, E. (1967) The Abundance Ratio of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in Marine Environments Environments Records of Oceanographic Works in Japan., **9**, No. 1, 37-53
- 12) Mariotti A., Landreau, A. and Simon, B. (1988) ^{15}N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. Geochimica et cosmochimica Acta, **52**, 1869-1878
- 13) Wilson, G. B. (1986) Isotope geochemistry and denitrification processes in ground-waters Ph. D. thesis. Univ. of Bath, pp. 242

Résumé

The nitrogen isotopic method was applied to demonstrate that denitrification occurs in Kiryu watershed. Nitrate concentration and isotopic composition ($\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$) in the soil solution was measured. Under anaerobic conditions; after heavy rains, increases in $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ values correlated to decreases in nitrate concentration were observed at the depth of 50 and 70 cm. Under aerobic conditions such changes were not observed. These results suggest that denitrification occur at these depths only under anaerobic conditions.

A model is proposed to explain the dynamics of soil solution through the variations of nitrate concentration and $\delta^{15}\text{NO}_3\text{-N}$ values which are affected by plant uptake, mixing, nitrification and denitrification.