

6. 生態系の反応プロセスを考慮した森林土壌酸性化の解析と将来予測

Analysis and Prediction of Soil Acidification Considering Some Processes in a Forest Ecosystem

堀内将人*, 由井栄太郎**, 森澤眞輔***

Masato Horiuchi, Eitaro Yui, Shinsuke Morisawa

ABSTRACT ; Referring to the SMART model, the organic layer model was developed to describe acidification of forest organic layer. The organic layer model and the modified SMART model were combined to evaluate forest soil acidification more properly. This new model is called two layers model. Considering ecosystem processes concerned to acidification or neutralization, ex. nitrogen mineralization, nitrification, nutrient uptake and creation of organic acid, forest soil acidification was predicted for 100years using the two layers model. Model prediction revealed that nitrogen mineralization rates and nitrification rates had great effects on forest soil acidification and that organic layer neutralized acid deposition.

KEYWORDS ; forest soil acidification, some processes in a forest ecosystem, two layers model, model prediction

1. はじめに

これまでに、酸性雨やオゾンの影響についての研究等、森林衰退の研究は様々に行われている。しかし、明確な因果関係を持つ原因が同定された例は少ない。酸性雨が関与する森林衰退の原因の一つに土壌酸性化がある。現在、森林土壌酸性化に関する研究は酸性雨によるものがほとんどであり、森林生態系の諸反応プロセスによる影響や有機酸による影響はあまり考慮されていない。しかし、実土壌のpH(H₂O)が酸性雨のpHより低い観測結果¹⁾も報告されていることから、森林土壌酸性化を酸性雨の影響だけで説明するのは不十分であると言える。森林土壌酸性化に生物反応や有機物層が与える影響は、酸性降下物による森林土壌酸性化と比較して無視できないことも指摘されている²⁾。

上述のような現状をふまえて、本研究では、生物反応、栄養分の植物根からの取り込み、有機酸の生成反応等の森林生態系の諸反応プロセスが森林土壌酸性化に与える影響を考慮したSMARTモデルと、有機物層に適用可能なモデル(O層モデル)とを組み合わせて、森林土壌酸性化の総合的な将来予測が可能な2層モデルを構築した。さらに、生態系での反応プロセスによる酸の負荷、緩衝に関するいくつかのシナリオを設定し、2層モデルを用いた今後100年間にわたる数値シミュレーションを行うことによって、森林土壌酸性化に関する将来予測を行った。

2. モデルの構築

2.1 O層モデルの構築

SMARTモデルはA層土壌を対象としているため、有機物を多く含むO層土壌にそのまま適用するのは困難である。著者らのこれまでの研究において、SMARTモデルはA層のカラム実験結果をかなりの確に表現できていた³⁾が、O層の実験結果は的確には表現できていない。本研究では、SMARTモデルをO層に適用できるように以下の2点について改良を行った。

* 大同工業大学建設工学科 Dept. of Construction Eng., Daido Institute of Technology

** (株) きんでん Kinden Corporation

*** 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 Dept. of Global Environment Eng., Kyoto Univ.

1. O層にはアルミニウムが含有されていないことから、酸の緩衝にはアルミニウムは関与しない。そのため、モデルにおいてアルミニウムは考慮しない。
 2. O層での有機物の分解に伴う有機酸の生成をモデルに組み込む。
- 以下に上記の改良を加えたO層モデルの方程式群を示す。

電荷の中和式

$$[H^+] + [BC^{2+}] + [NH_4^+] = [NO_3^-] + [SO_4^{2-}] + [OC^-] \quad (1)$$

物質収支式

$$\frac{d}{dt} X_{tot} = IN_X - PS[X] \quad (2)$$

ただし、 X_{tot} : 土壤中でのイオンXのトータル量($\text{mol}(+)/\text{m}^2$)、 IN_X : 土壌へのXのインプット($\text{mol}(+)/\text{m}^2\text{yr}$)、 $[X]$: 土壌溶液中のイオンXの平衡濃度($\text{mol}(+)/\text{m}^3$)、 PS : 有効降雨量[降雨量・蒸発散量](m/yr)であり、 BC^{2+} は塩基性陽イオン[Base Cation(Mg^{2+} , Ca^{2+})]を意味している。また、 OC^- は土壌有機酸を表している。

土壌溶液および交換体からなる土壌システムへのXのインプットを示す IN_X は、 DEP_X で示す大気からの降下物量および W_X で示すリターの溶解、 UPT_X で示す塩基性陽イオンおよび窒素の植物への取り込み、 $IMMN$ で示す有機態窒素の無機化により与える。

$$IN_{SO_4} = DEP_{SO_4} \quad (3)$$

$$IN_{NO_3} = DEP_{NO_3} + f_{nit} DEP_{NH_4} - UPT_N \frac{[NO_3^-]}{[NO_3^-] + [NH_4^+]} \quad (4)$$

$$IN_{NH_4} = (1 - f_{nit}) DEP_{NH_4} + IMM_N - UPT_N \frac{[NH_4^+]}{[NO_3^-] + [NH_4^+]} \quad (5)$$

$$IN_{BC} = DEP_{BC} + T W_{BC} - UPT_{BC} \quad (6)$$

ここに、 DEP_X : 土壌へのXの降下物量($\text{mol}(+)/\text{m}^2\text{yr}$)、 UPT_X : 植物の土壌からのXの取り込み($\text{mol}(+)/\text{m}^2\text{yr}$)、 $IMMN$: 有機態窒素の無機化($\text{mol}(+)/\text{m}^2\text{yr}$)、 f_{nit} : 硝化係数($0 \leq f_{nit} \leq 1$)、 W_X : 土壌中でのイオンXの風化量($\text{mol}(+)/\text{m}^3\text{yr}$)、 T : 土壌コンパートメントの厚さ(m)である。

硝化係数は NH_4^+ と NO_3^- の、 NH_4^+ のインプットに対するパラメータである。 NH_4^+ の一部が硝化されて NO_3^- になる場合は $f_{nit} < 1$ となり、 NH_4^+ および NO_3^- の植物への取り込みは、それらの濃度に比例する。

SO_4^{2-} 、 NO_3^- の土壌への吸着を無視することで次式が得られる。

$$X_{tot} = \Theta T [X] \quad (7)$$

ここに、 X_{tot} : 土壌中のイオンXのトータル量、 Θ : 土壌の体積含水率(m^3/m^3)である。

塩基性陽イオンの総量は土壌溶液と交換体に占める塩基の和として、次式で定義される。

$$BC_{tot} = \Theta T [BC^{2+}] + \rho T f_{BC} \cdot CEC \quad (8)$$

ここに、 ρ : 土壌の見かけ密度(kg/L)、 f_{BC} : 交換体に占める塩基の割合(-)、 CEC : 土壌の陽イオン交換容量($\text{mmol}(+)/\text{kg}$)である。交換反応式には活量を濃度で置き換えたGaines-Thomas式を採用する。

$$\frac{f_H^2}{f_{BC}} = K_H \frac{[H^+]^2}{[BC^{2+}]} \quad (9)$$

ここに、 K_H : HとBCの交換に関するGaines-Thomasの交換定数($\text{L}/\text{mol}(+)$)である。交換体は H^+ 、 BC^{2+} により占められると仮定することにより、次式が成立する。

$$f_H + f_{BC} = 1 \quad (10)$$

2.2 2層モデルの構築

本研究では、O層を考慮した森林土壌酸性化の評価を行うためSMARTモデルと、前節で新たに構築したO層モデルとを結合し、2層モデルを構築する。O層のアウトプットである H^+ 、 BC^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ のうち、 H^+ は直接のインプットとはせず、 BC^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ は DEP としてA層のインプットとする。

2層モデルの構造ダイアグラムを図1に示す。

3. 2層モデルによる日本の森林土壌酸性化の将来予測

3.1 パラメータ値の設定

(A) 実測またはフィッティングにより設定するパラメータ

2.2で構築した2層モデルを用いて、実土壌を想定した数値シミュレーションを実施し、日本における森林土壌酸性化の今後100年間にわたる将来予測を試みる。土壌の物理化学的特性に関するパラメータ値は、筆者らが京都府北桑田郡京北町のスギ林において採取したO層、B層土壌の実測値、および採取土壌を用いたカラム実験結果に対してモデルシミュレーションを実施することにより得た⁴⁾フィッティングパラメータ値を用いる。設定したパラメータ値一覧を表1に示す。単位時間 (unit time) は4日である。本研究における将来予測モデルには有機酸の影響を考慮するが、O層よりも下部層の土壌特性値としては有機酸の影響を受けていない土壌に関する値を採用することが望ましい。したがって、本研究ではO層下部に位置する土壌の特性値をB層の特性値で代表させた。

(B) 酸性雨に関するパラメータ

モデルシミュレーションに用いる酸性降水物量は実測データを基本とする。京都府において観測されている林内雨、林外雨の平均値⁵⁾を表2、表3に示す。本研究では森林土壌を対象としているため、計算のインプットには林内雨のデータを用いた。

(C) 窒素の循環に関するパラメータ

年間の窒素の無機化量については種々の値が報告されている。本研究では、日本のスギの若齢林に対して報告されている値のほぼ平均値0.38~0.52 mol/m²/yrを採用する。硝酸化成率は気温、湿度等により大きく変化する。本研究では、O層での硝酸化成率30~50%、A層での硝酸化成率50~80%を採用した。

土壌中での窒素の形態変化は微生物による。微生物の働きは土壌のpHの変動に影響を受ける⁶⁾。本研究で

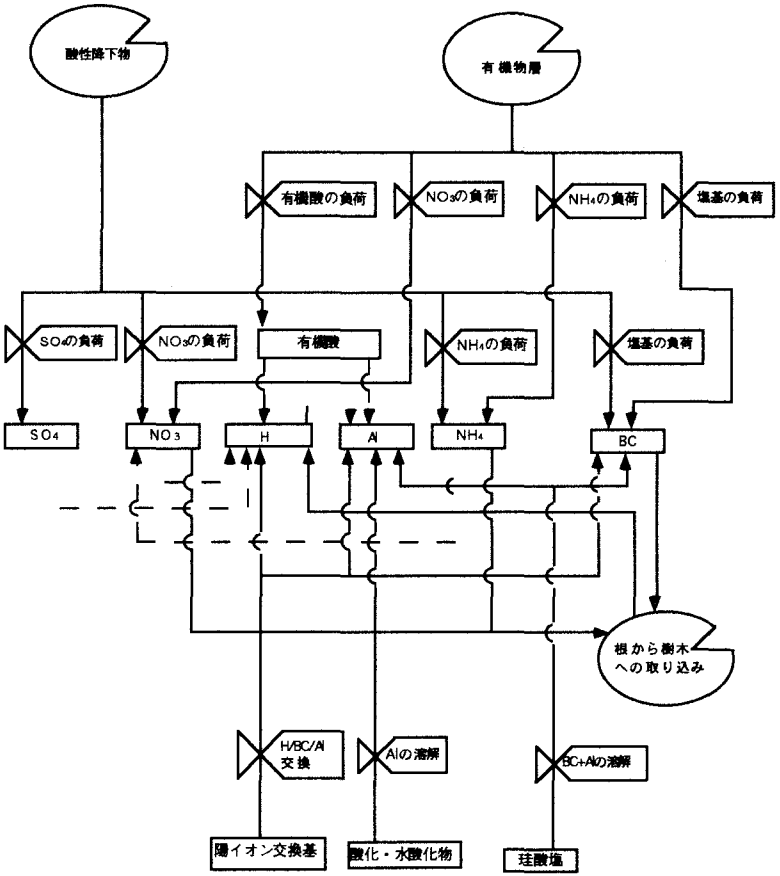


図1 2層モデルの構造ダイアグラム

表1 土壌酸性化将来予測において設定した土壌の物理化学的特性に関するパラメータ値一覧

記号	単位	B層	O層
ρ	kg/L	0.94	0.30
Θ	m ³ /m ³	0.39	0.85
T	m	0.15	0.10
CEC	cmol(+)/kg	11.7	42.7
PS	m/unit time	0.01	0.01
$f_{BC,0}$	-	0.23	0.45
r	-	1	-
W_{BC}	mol/L unit time	80×10^{-4}	70×10^{-4}
$A_{lox,0}$	mmol(+)/kg	18	-
K_{gibb}	(mol/L) ²	2×10^6	-
K_{Al}	mol/L	20	-
K_H	L/mol	5.0×10^5	4.0×10^6

r_{Al} とBCの風化の割合、 $A_{lox,0}$:酸化・水酸化Al初期量、 K_{gibb} :ギブサイトの溶解定数、 K_{Al} :AlとBCとの交換定数

は、土壌pH変化による微生物活動の変化を以下のようにモデルに反映させた。

1. 有機態窒素の無機化とアンモニア態窒素の硝化はpH4.4まではpHの影響を考慮せず、pH4.4～3.6では漸減し、pH3.6以下では有機態窒素の無機化とアンモニア態窒素の硝化はおこらない。
2. 脱窒は全てのpHにおいて無視できる。

樹木による窒素の取り込みに関しては、アンモニア態窒素としての取り込みと、硝酸態窒素としての取り込みを考慮し、その割合は溶液中のアンモニア態窒素と硝酸態窒素の割合に等しいとした。アンモニア態窒素の硝酸化成はO層、A層の両層において行われるとした。また、根からの窒素や無機物の取り込みはA層で100%行われるとした。平均的な硝酸化成率はO層で50%、A層で50%とする。樹木による根からの窒素の取り込みにpHが与える影響は無視する。

(D) 無機栄養塩の根からの取り込みに関するパラメータ

無機栄養塩の根からの取り込みは窒素の取り込み量と相関がある⁷⁾。本研究では、樹木は窒素の根からの取り込み量の1/2の量の無機無機栄養塩を根から取り込むとした。無機栄養塩の根からの取り込みにも土壌pHは影響を与えないとする。

(E) 有機酸の生成に関するパラメータ

溶液の有機酸濃度は、Driscoll⁸⁾らの報告による有機酸の酸度を計算した結果と、富士山におけるブナ林およびヒノキ林の土壌浸透水の水質⁹⁾から推定した有機酸濃度を参考に、0.05～0.13mmol(-)/Lに設定した。また、溶液中の有機酸濃度にpHが与える影響については研究例がないため、本研究では溶液中の有機酸濃度にpHは影響を与えないとする。また、カラム実験で得た知見⁴⁾から、溶液のpHが4.6以下になると有機酸によりAlは溶出し、溶出したAlが有機酸と錯体を形成するとした。

3.2 土壌酸性化の将来予測

(A) 土壌酸性化のシナリオ

土壌酸性化に影響を与える生態系の諸反応プロセスについて、土壌酸性化が1) 平均的に進む、2) 最も遅く進む、3) 最も速く進むの3つのシナリオを設定した。各シナリオに対応する各プロセスのパラメータ値は前節で示した範囲内で設定した。設定した値を表4に示す。

(B) 結果と考察

以下に各シナリオに基づいて土壌酸性化に関する100年間の将来予測を行った結果および考察を示す。

表4 将来予測のために設定した生態系の諸反応プロセスに関するパラメータ値

			シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
	記号	単位	土壌酸性化が平均的に進む	土壌酸性化が最も遅く進む	土壌酸性化が最も速く進む
窒素の無機化	NIMM	mol/L	0.44×10^{-3}	0.25×10^{-3}	0.6×10^{-3}
硝酸化成	FNITO	%	O層：50	O層：50	O層：30
	FNIT		A層：50	A層：50	A層：80
Nの取り込み	NUPT	mol/L	0.2×10^{-3}	0.1×10^{-3}	0.3×10^{-3}
BCの取り込み	BCUPT	mol/L	0.1×10^{-3}	0.05×10^{-3}	0.15×10^{-3}
有機酸濃度	OC	mmol(-)/L	0.09×10^{-3}	0.05×10^{-3}	0.13×10^{-3}

シナリオ1. 土壤酸性化が平均的に進む場合（図2）

今後100年間で水素イオン濃度は約0.05mmol(+) /Lからわずかに減少し、アルミニウム濃度はほぼ0で一定、塩基性陽イオン濃度は約0.35 mmol(+) /Lからわずかに上昇している。シナリオ1は土壤酸性化に与える生態系の影響を平均的に設定したが、将来予測を行うと、土壤中の酸は経年的に緩衝されることが分かる。

シナリオ2. 土壤酸性化が最も遅く進む場合（図3）

今後100年間で水素イオン濃度は約0.03mmol(+) /Lからわずかに減少し、塩基性陽イオン濃度は約0.25mmol(+) /Lからわずかに上昇する。アルミニウム濃度はほぼ0で一定である。

シナリオ3. 土壤酸性化が最も速く進む場合（図4）

約20年後までに水素イオン濃度は約0.06mmol(+) /Lから約0.1mmol(+) /Lまで上昇、塩基性陽イオン濃度は約0.5mmol(+) /Lから約0.25mmol(+) /Lに減少、アルミニウム濃度が約0.05mmol(+) /Lに上昇する。その後100年後まで水素イオン濃度、塩基性陽イオン濃度、アルミニウム濃度ともほぼ一定の値になった。本シナリオではO層での硝化が30%と少なく、A層で硝化が80%おこるとしている。そのため、O層での酸の緩衝があまり行われず、A層において酸性化が進行したものと考えられる。

3.3 生態系の諸プロセスが土壤酸性化に与える影響

(A) 評価方法

本節では、土壤酸性化に影響を与える諸反応プロセスが、個別に土壤酸性化に対してどの程度影響するかを評価する。アンモニア態窒素の硝化成功率は、O層、A層での割合に注目し、割合の変化が土壤酸性化に与える影響について評価した。

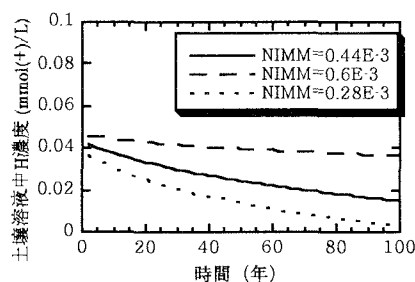
(B) 結果と考察

以下に各反応プロセスを単独に変化させたときの土壤酸性化の将来予測結果を示し、考察を加える。

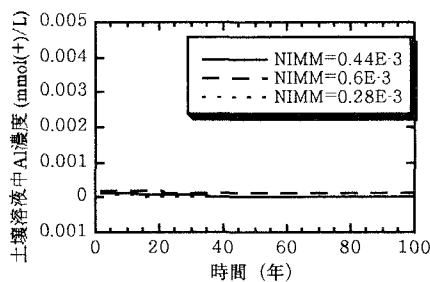
(1) 窒素の無機化量（図5）

溶液中アルミニウム濃度にはあまり変化を与えない。無機化量が多くなると、水素イオン濃度は高くなり、塩基性陽イオン濃度も高くなる。アンモニア態窒素の硝化成功率はO層で50%、A層で50%であるため、全アンモニア態窒素の内75%が硝酸態窒素になる。そのため、無機化量が多いほど、すなわち、アンモニア態窒素が多くなるほど硝酸態窒素も多くなり、土壤酸性化が促進されたとと言える。

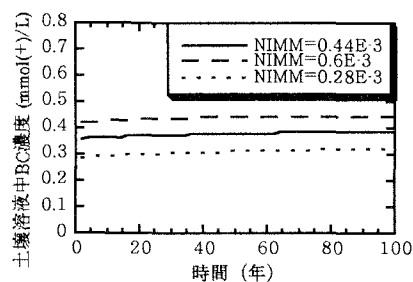
(2) 硝化成功率（図6）



(a) Hの変化



(b) Alの変化



(c) BCの変化

図5 窒素の無機化量の変化が土壤酸性化に及ぼす影響

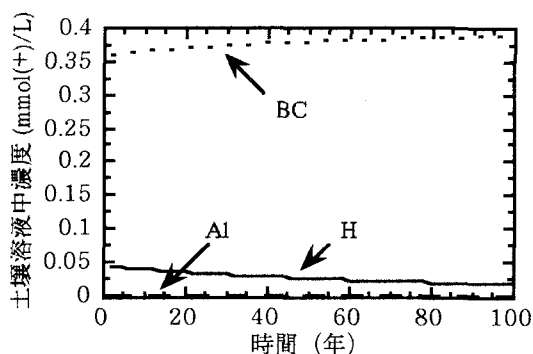


図2 シナリオ1の場合の将来予測結果

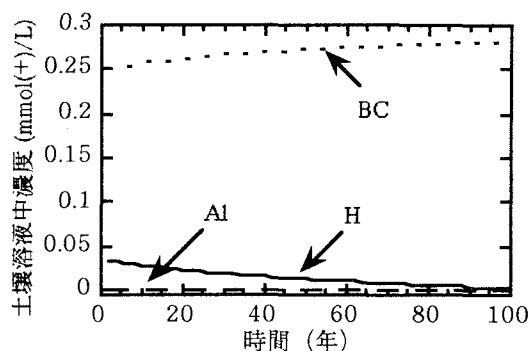


図3 シナリオ2の場合の将来予測結果

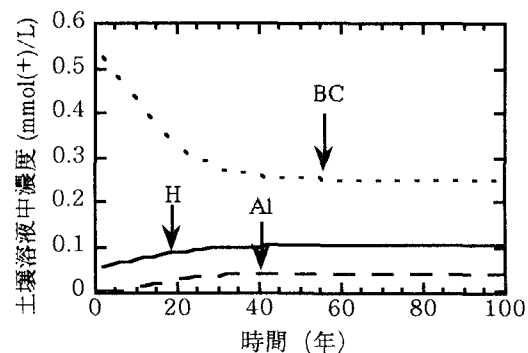


図4 シナリオ3の場合の将来予測結果

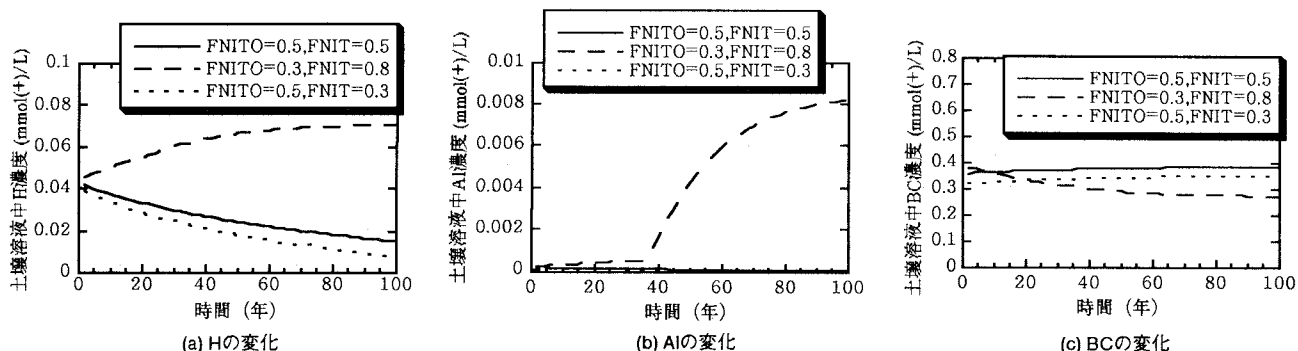


図6 硝化成率の変化が土壌酸性化に及ぼす影響

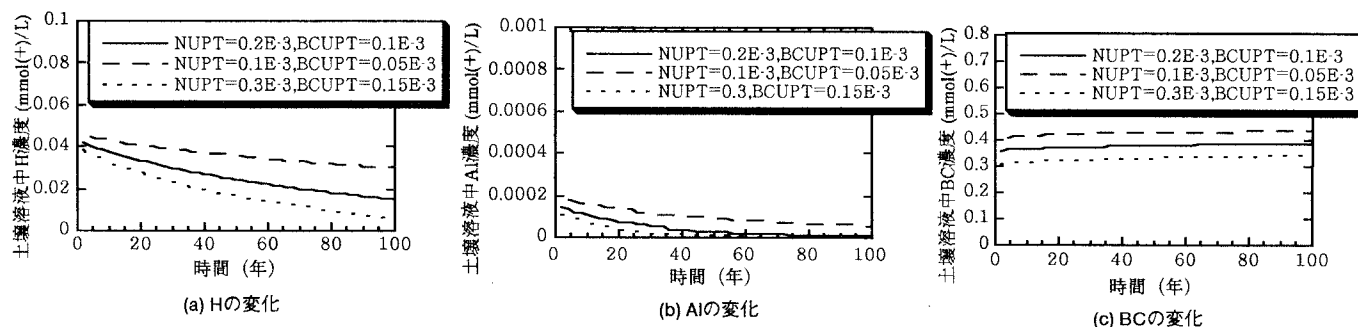


図7 根からの養分の取り込み量の変化が土壌酸性化に及ぼす影響

O層の硝化成率を30%、A層の硝化成率を80%にしたときに、他の条件と大きく異なり、水素イオン濃度が年々上昇し、アルミニウム濃度が約40年後から上昇し始め、塩基性陽イオン濃度が減少した。O層で50%硝化が行われると、酸はO層において緩衝され、アルミニウム濃度は増加せず、塩基性陽イオン濃度も減少しない。

(3) 根からの取り込み量 (図7)

根からの養分の取り込み量を増加させると、溶液中水素イオン濃度、アルミニウム濃度、塩基性陽イオン濃度は減少した。根の養分の取り込みは、 NH_4^+ 、BCが酸を負荷し、 NO_3^- が酸を緩衝するが、総合的に見れば根からの養分の取り込みは、土壌酸性化を抑制する働きを示していることが分かる。

4. おわりに

本研究で得られた結果ならびに結論を以下に要約する。

- (1) 土壌の酸性化を評価するモデルとしてSMARTモデルを参考とし、O層とA層の酸性化を分離して評価できる2層モデルを構築した。さらに、2層モデルにより森林土壌酸性化の将来予測を行うため、森林生態系における諸反応プロセスに関するパラメータ値を設定した。
- (2) (1)で設定した各パラメータ値を基本とし、酸性化が進行していない森林土壌を対象に、今後100年間の土壌酸性化を予測した。その結果、生態系の諸反応プロセスによる土壌酸性化が最も速く進むと設定したシナリオにおいてのみ、今後100年間に土壌酸性化が進行し、アルミニウムの溶出が見られた。
- (3) 土壌酸性化に関与する諸反応プロセスの中で、窒素の無機化量、根からの養分の取り込み量の変化に比べてA層での硝化成率が土壌酸性化に与える影響が大きい。

参考文献

- 1) 宇都宮ら：大気汚染学会誌, Vol.28, pp.159-167, 1993. 2) Driscollら：Tellus, Vol.34, pp.283-292, 1982. 3) 堀内ら：第3回地球環境シンポジウム, pp.181-186, 1995. 4) 堀内：科研費補助金報告書, 1998. 5) 谷尾ら：京都府衛公研年報, Vol.38, pp.55-61, 1993. 6) 例えばHovlandら：SNSF Project. Oslo, Norway IR/14. 15p, 1975. 7) 渡辺：東大演習林報告, Vol.69, pp.145-156, 1979. 8) Driscollら：Environ. Sci. Technol., Vol.19, pp.1018-1024, 1985. 9) 井上ら：日本土壌肥科学雑誌, Vol.64, pp.265-274, 1993.