

酸性雨生態系等影響実態調査（氷ノ山での渓流水、土壌・植生調査）

第1報

【大気・地球環境室】

九鬼貴弘、吉田篤史、田中長義、田中卓実、尾田喜夫

【環境化学室】

池山恒平、門木秀幸

【林業試験場 森林管理研究室】

中村徳和

Investigation on the influences of acid rain in mountain stream, soil and plants in Mt Hyonosen No.1

Takahiro KUKI, Atsushi YOSHIDA, Osayoshi TANAKA, Takumi TANAKA, Yoshio ODA
Kouhei IKEYAMA, Hideyuki MONGI, Norikazu NAKAMURA

Abstract

Acid rain (deposition) is one of the typical global environment problems, in North Europe and North America they sustained various damages that the trees, in large number of forest, had been blighted, and the fishes, in large number of river and lakes, had died out. etc.

In Tottori prefecture, acid rain (deposition) has also been detected for many years, and especially in winter season, by seasonal wind with acidic matter (SO_x, NO_x), seems to be brought from the continent of China, acidity of deposition has tended to increase.

Although the effects of acid rain are recognizable, the exact influences on the ecosystem are not well-understood. Moreover, although the ecosystem is known to express many buffer functions against acid rain, the mechanisms and limits of these buffer functions are relatively unknown. And it is said that once the influences on ecosystem become obvious, their recovery is very difficult.

To take things described above into consideration, to obtain the knowledge about the influences of acid rain (deposition) on ecosystem in Tottori prefecture, we have investigated the actual conditions of influences about mountain stream, soil and plants which are typical medium of ecosystem, around the Mt. Hyonosen, where we have set up monitoring point of acid deposition, of mountainous region, is said to be easy to be influenced of acid rain (deposition) (Fig.1-1, 1-2). We obtained the knowledge, that following;

- 1) Mountain stream : On the whole, mountain stream is neutral and resistant to acidification, but the period of snowmelt, from winter to early spring, and the time when we have heavy rain, it is suggested to be influenced.
- 2) Plants (Forests) : Although disorders on form of trees and growth of branches, seemed to be caused by natural selection, were observed, the decline, obviously caused by acid rain (deposition), have not confirmed.
- 3) Soil : We surveyed the Brown forest soil in Japanese cedar forests, it was found that, centered on the surface layer, acidity of the soil was intense, and the proportion of basic cations (Ca²⁺、Mg²⁺、Na、K) was low, and of acidic cations (Al (OH)₃、H⁺) is high, then it was suggested that the soil has been acidified.

1 はじめに

酸性雨は地球環境問題の代表的な1つであり、ヨーロッパや北米では森林の枯死や河川・湖沼での魚類の死滅等の被害が生じた。一方、酸性雨（降水）は県内でも観測されており、特に冬場の北西の季節風により、ユーラシア大陸側諸国起源の酸性原因物質（硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響を受け、冬場に降水の酸性度が高くなる傾向である。これら諸国の経済発展とともに、酸性雨の原因となる窒素酸化物、硫黄酸化物の排出量の増加も予想され、日本海を挟んでこれらの国々と対面している鳥取県へのさらなる影響が懸念される。

いまのところ、県内で酸性雨の影響による被害は確認されていない。土壤等の生態系の酸緩衝能が大きいためと言われているが、その実態や機構については不明な点が多い。また、生態系への影響は一度顕在化すると回復困難であると言われる。このことから、酸性雨の生態系への影響についての知見を得るため、酸性雨の影響を受けやすいといわれる山岳地域のうち、降水観測点のある氷ノ山周辺で、代表的な生態系媒体である渓流水、土壤、植生について実態調査を実施した（Fig. 1 - 1、1 - 2参照）。

調査は林業試験場と共同で実施し、林業試験場で植生調査を、衛生環境研究所では渓流水及び土壤調査・分析を実施した。

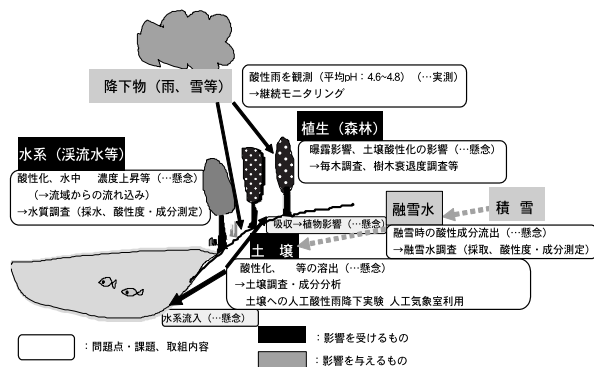


Fig. 1 - 1 酸性雨の生態系影響と調査研究について



Fig. 1 - 2 調査地点（氷ノ山）
降水調査地点周辺で渓流水、土壌・植生調査を実施

2 方法

1) 渓流水調査

氷ノ山を源流とする「つぐ米川」水系渓流等5地点で水質調査を実施した（*印の地点については「より影響を受けやすいと考えられる渓流上流の支流部についてH16年度から追加実施）。

- 地点：上流（つぐ米）、中流（茗荷谷）、茗荷谷ダム、県境付近渓流*、尾出見橋*（Fig. 1 - 2）
- 回数：1回/月（台風・秋雨等の長雨時、及び融雪時に頻度を上げて実施）
- 分析項目・方法：

ポリ瓶に満水まで採取して気相を残さないように密栓、氷冷して持ち帰り、以下のとおり測定した。

pH：ガラス電極法（採水時に実施）

アルカリ度：0.1mol/L - HCl滴定 - ガラス電極法

EC：導電率法

Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺：
ディスク型メンブランフィルター（MILLIPORE MillexR-LH孔径0.45 μm）で濾過し、イオンクロマトグラフ法で測定

溶解性Al等：ディスク型メンブランフィルター（MILLIPORE MillexR-LH孔径0.45 μm）で濾過し、ICP発光分析法（超音波ネブライザー使用）で測定

2) 土壌・植生調査（植生調査は林業試験場で実施）

「土壌・植生モニタリング手引書（平成15年3月4日 8月環境省地球環境局）」（以下「手引書」という）に従い実施した。なお、手引書に記載されていない詳細部分については、以下の文献に従って実施した。

「土壌断面記載ガイドライン第3版(改訂版) F A O (訳・監修:農林水産省林野庁森林総合研究所)」

「土壌環境分析法(1997年、土壌環境分析法編集委員会編)」

「土壌養分分析法(1994年、土壌養分測定法委員会編)」

- (1) 地点:氷ノ山・国道482号沿県境付近スギ林(国有林、Fig. 1 - 2 参照)
- (2) 調査時期:2~3回/年(春~秋)
- (3) 調査プロット:調査林内に土壌調査プロット、植生調査プロットをFig. 2 - 1のとおり設定した。

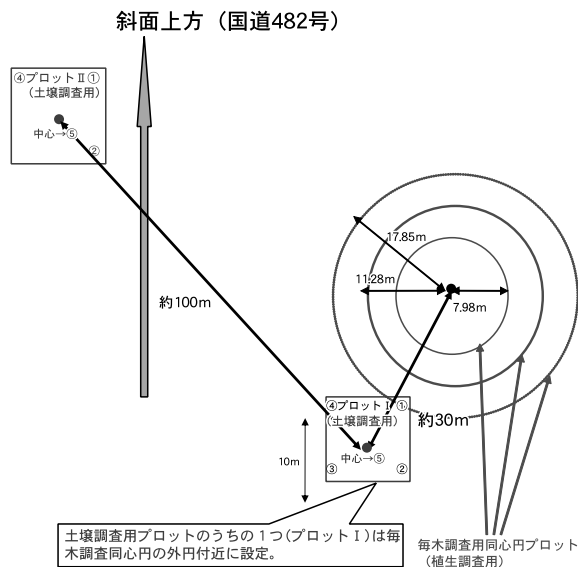


Fig. 2 - 1 土壌・植生調査プロットの位置関係
氷ノ山県境付近スギ林内(褐色森林土壌)

(4) 植生調査(林業試験場実施)⁵⁾

植生は様々な影響要因の変化を受けやすいことから、酸性雨による潜在的影響の早期発見に有用である。そこで、地域の植生(変化)を把握するため、大・中・小(半径:各7.98m、11.28m、17.85m)3つの同心円からなるプロットを1箇所設定し(Fig. 2 - 1)、各円毎に計測プロットをTable 2 - 1のとおり3分し、以下のとおり調査を実施した。

Table 2 - 1 調査のための計測プロット区分

計測プロット(同心円)半径・面積	計測対象草木
・ (半径:7.98m、 面積:200m ²)	・ 樹高1.3m以上の個体
・ (半径:11.28m、 面積:400m ²)	・ 胸高(高さ1.3m) 直径4cm以上の個体
・ (半径:17.85m、 面積:1000m ²)	・ 胸高(高さ1.3m) 直径18cm以上の個体

毎木調査:プロット内の調査対象木について、樹種名、胸高直径及び樹高を以下のとおり計測した。

- a) 樹種名:和名で記載。
- b) 胸高直径DBH:斜面側か高い位置にある樹幹側で樹高1.3m部の樹幹直径を0.1cm単位で計測。
- c) 樹高:最も高い木と最も低い木を含む20本以上の木を選定し、測高器、測桿等を用いて測定して0.1m単位で記録。

下層植生調査:樹木に比べて環境変化に敏感であると考えられる下層植生について、プロット内の最小円の計測プロット内(半径7.98m、面積200m²)に見られる樹高1.3m以下の全ての樹木、草、シダ類について、その植物名と優占度をTable 2 - 2の区分に従って記載した。

Table 2 - 2 優占度の区分

区分(優占被度級)	その種の被度と数度(個体数)
5	>75%
4	51~75%
3	26~50%
2	6~25%
1	1~5%、又は多数個体で被度が<1%
+	<1%

樹木衰退度調査:樹木衰退の要因として、大気汚染や酸性雨による影響の他、気象の影響(強風、豪雨等)、生物的影響(動物、病虫害、材の腐朽)や人的影響(造林施業、伐採)等の外的生長阻害因子が考えられ、これらを推定するには、長期間のモニタリングが必要(3~5年毎)である。そこで定期的に樹木の健全度合(Table 2 - 3参照)を観察記録し、周辺の環境要因を踏まえて衰退原因を推定するものである。

- a) 対象樹木の選定:印を付けた調査プロットの中心から12m離れた東西南北の4箇所に優占する樹木各5本、計20本を「モニタリング対象樹木」として選定した。
- b) 樹木衰退度の観察:葉の壊死、白化、変色、異常落葉、梢端枯れをポイントとして観察し、異常が見つかった場合には以下の点について詳細を記録した。
被害を受けた葉の位置、被害形態と位置
葉面上のチリ・粉じんの観察
傷んだ樹木や枯損木の存在又は生長の鈍化
被害状況の発見日
- c) 樹木の全衰退度階級の評価:Table 2 - 3の衰

退度評価基準に従って、以下の項目を観察。

樹木の活力、形状

枝の成長度、梢端枯損の有無

葉の密度、奇形、大きさ、色、痛み具合

d) 樹木衰退原因の推定：衰退原因を推定できる場合、推定される原因と推定理由を記載。

Table 2 - 3 樹木衰退度調査の測定項目及び評価基準

項目	評点	衰退度評価基準
樹勢	0	旺盛な生育状態を示し、被害が全く見られない
	1	いくぶん被害の影響を受けているが、あまり目立たない
	2	明らかに異常が認められる
	3	生育状態が劣悪で回復の見込みがない
	4	枯死
樹形	0	自然の樹形を保っている
	1	若干の乱れはあるが、自然形に近い
	2	自然樹形の崩壊がかなり進んでいる
	3	自然樹形が完全に崩壊され、奇形化している
	4	枯死又は枯死寸前
枝の生長量	0	正常
	1	少ないが、それほど目立たない
	2	短く細い
	3	極端に短い
梢端の枯損	0	なし
	1	多少あるが、目立たない
	2	かなり多い
	3	著しく多い
	4	枯死
枝葉の密度	0	枝と葉の密度のバランスがとれている
	1	枝と葉の密度のバランスが少し乱れている
	2	やや疎
	3	枯葉が多く著しく疎
葉の変形度	0	正常
	1	少し変形している
	2	明らかに変形している
	3	変形が著しい
葉の大きさ	0	正常
	1	少し小さい
	2	明らかに小さい
	3	著しく小さい
葉色	0	正常
	1	少し異常
	2	異常
	3	著しく異常
葉の障害	0	健全
	1	少しある
	2	明らかにある
	3	著しく多い

(5) 土壌調査^{5), 6), 7), 8)}

調査プロットの設定

a) 一辺10mの正方形プロットをFig. 2 - 1のとおり2プロット設定した。各プロットには、Fig. 2 - 2のとおり中心部1つ及び四方角4つの計5つのサブプロットを設定した。

b) 2プロットのうちの1つ(プロット)の中心を、植生調査プロット同心円の中心から30mの位置に設定し、もう1つ(プロット)は、プロット の中心部から斜面斜め上方向に100m離れた箇所に設定した。

c) 一辺10mの正方形プロットの中心部と対角線上の4箇所にサブプロットを設定した。

プロット中心部での現地調査及び試料採取幅約1m×奥行約2m×深さ約1mの穴を掘り、その一面(斜面上方側)に調査断面を作成し、「土壌断面記載ガイドライン」に従い、土色・土性を基に層位分けして土壌断面調査を実施した後、各層毎に試料採取した。

プロット四隅部での試料採取

幅50cm×50cm×深さ30~40cm程度の穴を掘り、深さ0~10cm部、及び10~20cm部で試料採取した。

試料調整等

採取した土壌(生土)試料を大型ポリエチレン袋に入れて持ち帰り、試薬等使用していない部屋で実験用ペーパータオルを敷いたかごに広げ、時々手で塊を潰しながら、また、木片・落葉・根等の夾雑物を取り除き、自然乾燥させた後、磁性乳鉢とシリコンゴム杵を用いて粉碎し、孔径2mmのふるいを通して「風乾細土壌試料」とし、以下の化学分析に供した。

化学分析

実施項目及び方法の概要は以下のとおり

a) 水分含量：秤量瓶に秤取し、乾燥機(105~110)で一晩乾燥・デシケータ中で室温まで放冷後、重量測定

b) pH (H₂O)、pH (KCl)：水又は1M-KClで振とう抽出・ガラス電極法

c) 交換性塩基 (Ca、Mg、K、Na)：1M-酢酸アンモニウム振とう抽出・遠心分離・原子吸光法

d) 交換酸度、交換性Al、H：1M-KCl溶液抽出・中和滴定法

3 結果及び考察

1) 渓流水調査

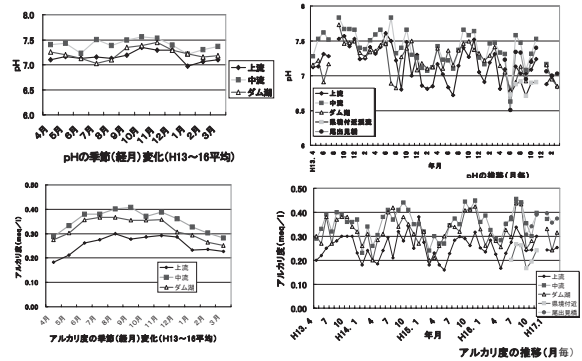
- (1) pH、アルカリ度 (酸緩衝能の指標) について (Fig. 3 - 1 参照)

4年分のデータがある3地点について、平均値 (H13~16年度) で全体的な傾向を捉えと、

- a) 基本的には中性 (pH>7.0~7.5) で、緩衝能が一定レベル以上の状態 (アルカリ度>0.2meq/l、アルカリ度<0.2meq/lとなると酸感受性が高い状態であるとされる) で推移していた。
- b) pH、アルカリ度とも、上流<ダム湖<中流となり、3地点とも冬場から春先に低下 (酸性度が上昇し緩衝能が低下) する傾向であった。

個別の月毎の測定値の推移を見ると、冬場~春先にかけて、上流部を中心にpH<7、アルカリ度<0.2meq/lという状態を観測した。また、これ以外の時期 (夏~秋期) にも台風豪雨時に低下を確認した。

基本的には水系 (渓流水) は中性で酸への緩衝能力もあるが、上流部を中心に、冬期~春先にかけては融雪水の影響を、それ以外の時期ではまとまった降水時の流入水の影響を受けてpHやアルカリ度が低下するものと考えられる。



基本的には中性(pH7~7.5)で、アルカリ度も一定レベル以上(>0.2meq/l)であるが、冬場から春先に低下する傾向。また、これ以外の時期にも低下することが判った。
Fig. 3-1 渓流水調査結果 (pH、アルカリ度)

- (2) 成分 (陽・陰イオン) 濃度の推移 (Fig. 3 - 2、3 - 3)

成分 (陽・陰イオン) 濃度について、その季節変動

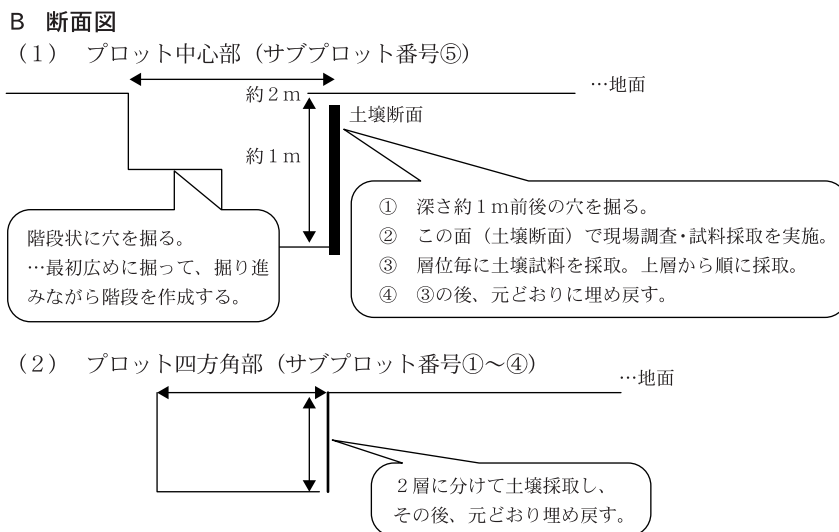
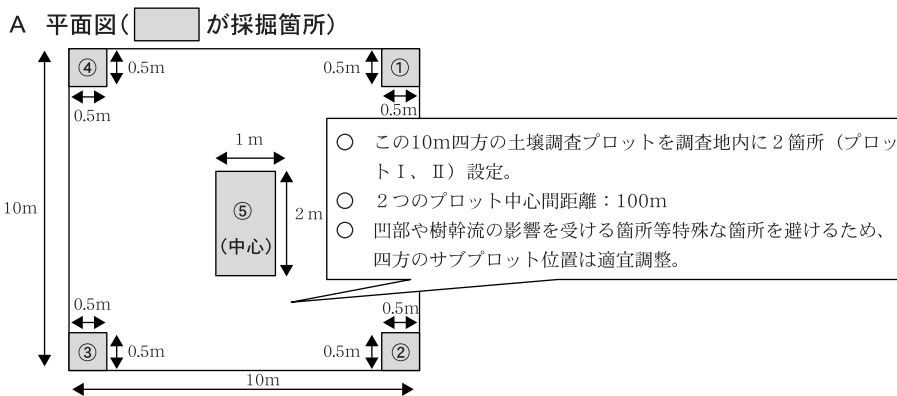


Fig. 2 - 2 土壌調査・採取地点 (プロット・サブプロット) の平面図・断面図

を中心に、年間を通じた4年間のデータが存在する3地点（上流、中流、荻荷谷ダム）の結果を示す。

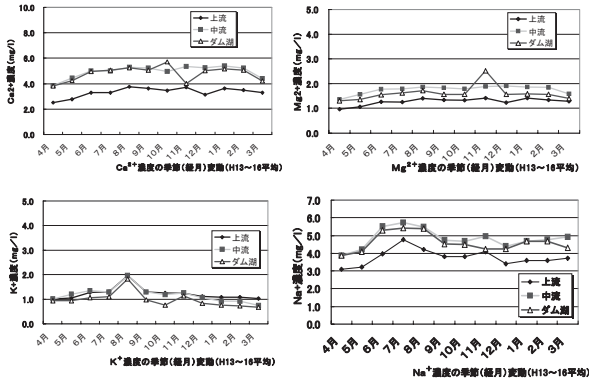


Fig. 3-2 陽イオン(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)の季節変動(H13~16平均)

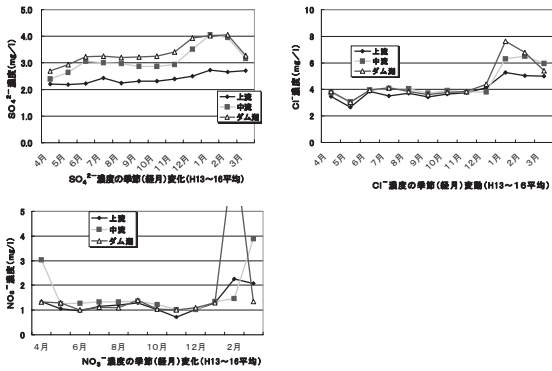


Fig. 3-3 陰イオン(SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻)の季節変動(H13~16平均)

陽イオン (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺) 濃度について

- a) 濃度（平均値）の順は、K⁺：上流 > 中流 > ダム、Ca²⁺・Mg²⁺・Na⁺：中流 > ダム > 上流であった
- b) 年間を通じた変動幅は比較的小さかった。
- c) 降水中の濃度（若桜町のH6～15平均値...Ca²⁺：0.25、Mg²⁺：0.18、K⁺：0.12、Na⁺：1.3mg / l）よりも遙かに高く、降水が地表降下後に土壌等から供給される（土壌等の緩衝作用の結果）と考えられる。

陰イオン (Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻) 濃度について

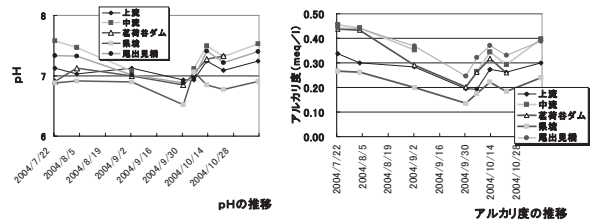
- a) 濃度の平均値の順は、これら3成分ともダム > 中流 > 上流であった。
- b) 陽イオンと比較すると季節変動が大きく、冬季に増加する傾向であった。
- c) 降水中のこれら濃度（若桜町のH6～15平均値...Cl⁻：2.4、SO₄²⁻：1.8、NO₃⁻：0.97mg / l）との差は比較的小さく、降水の状態を反映しやすいものと考えられる。

d) 3成分とも冬季に上昇した。

(3) 豪雨・長雨時調査結果

平成16年夏～秋にかけて台風が多く襲来し、県内でもその豪雨と強風によって大きな被害が出た。豪雨・長雨時には、降水の多くが土壤中に浸透せずに（緩衝作用を受けずに）一気に水系に流れ込むことにより、水系に影響が出ることが考えられる。そこで、秋雨前線と台風による長雨と豪雨が頻発した昨年9月下旬～10月にかけて、頻度を上げて調査した（約1回/週）。

その結果、全地点で豪雨後にpH、及びアルカリ度の低下、陽イオン濃度の低下が認められ、短時間に多量の降水が流れ込んだ影響が若干認められた。この傾向は、上流部ほど強いことが確認できた。ただ、一時的な水質変動（数時間レベル）までは捉え切れていないと考えられるため^{2), 3), 4)}、機器設置等による連続測定を検討中である。



H16年9月下旬～10月にかけて、豪雨後を中心に、詳細調査(約1回/週)を実施。豪雨後のpH、アルカリ度の低下傾向を確認。

Fig.3-4 長雨・豪雨時のpH、アルカリ度の推移(H16秋季)

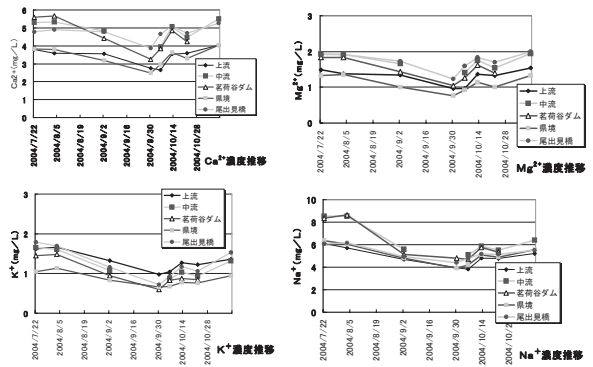


Fig. 3-5 長雨・豪雨時の陽イオン濃度の推移 (H16秋季)

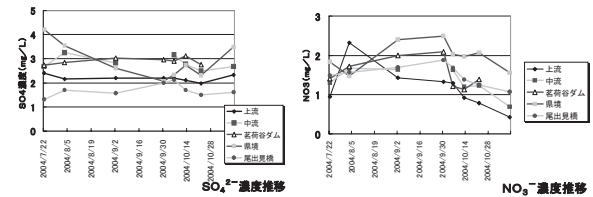
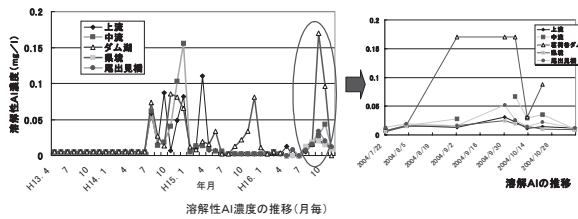


Fig.3-6 長雨・豪雨時の陰イオンの推移(H16秋季)

(4) 溶存AIについて

酸性化に伴って主に土壌等から溶出し、水生生物に影響を与えると考えられる溶解性AIは、ほとんど検出されていないが、不規則に、時折低濃度で検出されている。特に、H16年秋の豪雨時には調査地点全地点で検出（最大：H16年9月30日、溶存AI：0.025~0.17mg/L、pH：6.5~6.9）された。pHと溶存AI濃度とが複合的に影響を与えるとのことであるが、この検出の状態が水生生物に影響を及ぼすレベルのものか否かについて、検討する必要がある^{9)、10)、11)}。



- 溶解性AIは、これまで時折低濃度で検出（不規則的）。
- 今年秋にかけての長雨・豪雨時に全地点で検出。
- 検出値の検討（影響を及ぼすか否か）の必要。

Fig. 3-7 溶解性AIの検出状況

(参考)
 9月29日~30日未明：台風22号来襲、鳥取県内では東部を中心に豪雨被害。その後も長雨傾向。
 10月20日：台風23号来襲、兵庫県北部、京都府北部で大被害。

2) 植生調査（実施機関：林業試験場）

Fig. 2 - 1のとおり設定した同心円調査プロット内で実施した調査結果を手引書の記載様式に従って記載した。

(1) 毎木調査：Table 3 - 1 ~ 3 - 3 参照

調査対象樹種のほとんどがスギで、ミズキやトチノキが混在

調査実施樹木種・数...小円内：17本（スギ17本）、中円内：14本（スギ13本、ミズキ1本）、大円内：45本（スギ43本、ミズキ1本、トチノキ1本）

(2) 下層植生調査：Table 3 - 4 参照

小円プロット内で実施。高木層：1種（スギ）、亜高木層：2種、低木層：5種、草本層：42種

(3) 樹木衰退度調査：Table 3 - 5、Table 2 - 3 参照

選定した20本の樹木（スギ19本、ミズキ1本）のうち、2本（スギ）で衰退（状況：樹勢の異常、樹形の崩壊、枝の生長量が短く細い、枝葉の密度がやや疎）が認められた。しかし、これら2本の周辺に存在する他の樹木はいずれも健全であった。

これについて、樹木の成長過程で生長（樹高、幹の太さ、枝の密度、根貼り等）の個体差が生じ、他の個体よりも生長の悪い個体は、周りの木が陰になるなどしてさらに生長に差がついて（これを「庇圧」といい、一種の自然淘汰作用のようなもの）、衰退したと考えられた。

Table 3 - 1 毎木調査結果（同心円プロット小円内）

個体番号	樹種名	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
88	スギ	26.5	
89	"	59.6	
90	"	36.6	16
91	"	7.6	
92	"	29.8	
93	"	38.6	
94	"	38.0	
95	"	9.4	
96	"	24.4	
97	"	24.1	
98	"	30.7	
99	"	36.0	
100	"	17.2	
101	"	13.6	
102	"	41.1	
103	"	19.3	9.2
104	"	21.9	

Table 3 - 2 毎木調査結果（同心円プロット中円内）

個体番号	樹種名	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
C 34	スギ	38.6	
C 35	"	35.7	
C 36	"	49.8	
C 37	"	42.4	
C 38	"	18.9	
C 39	"	37.4	
C 40	"	21.0	15
C 41	"	16.3	
C 42	"	31.2	
C 43	"	8.0	
C 44	"	16.8	
C 45	"	19.1	
C 46	"	6.6	
H 64	ミズキ	19.2	14

Table 3 - 3 - 1 毎木調査結果 (同心円プロット大円内)
その1

個体番号	樹種名	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
H 65	スギ	38.8	17
H 14	スギ	43.0	
H 15	スギ	73.0	
H 16	ミズキ	22.4	
H 17	スギ	46.3	
H 18	"	21.2	
H 61	"	36.9	23
H 60	"	41.8	24
H 62	"	34.5	22
H 22	"	17.5	
H 63	"	33.7	20
H 24	"	40.3	
H 25	"	31.2	
H 26	"	39.4	
H 27	"	28.2	
H 28	"	36.8	
H 29	"	27.7	
H 30	"	25.7	
H 31	"	39.3	
H 68	"	34.7	14.5
H 69	"	24.5	14.5
H 66	"	21.9	11.3
H 35	"	36.4	
H 36	"	33.1	
H 67	"	23.1	16
H 38	"	21.4	
H 39	"	21.2	14

Table 3 - 3 - 2 毎木調査結果 (同心円プロット大円内)
その2

個体番号	樹種名	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
H 40	スギ	19.1	
H 41	"	43.0	
H 42	"	31.7	
H 43	"	32.9	
H 44	"	37.8	
H 45	"	23.1	
H 46	"	45.5	17.5
H 47	スギ	29.1	17
H 48	スギ	34.3	16.5
H 49	スギ	31.0	18
H 50	トチノキ	19.9	
H 51	スギ	34.7	
H 52	"	31.6	
H 53	"	53.3	18.5
H 54	"	36.8	
H 55	"	35.8	17
H 56	"	28.3	16
H 57	"	41.5	

Table 3 - 4 下層植生調査結果

地点名: 氷ノ山 (同心円プロット小円内)

調査実施日: 2004年9月15日

植物種の数: 47

植物名	優占度	植物名	優占度	植物名	優占度
高木層		キクバドコロ	+	リョウブ	+
スギ	5	ウリノキ	+	クロモジ	+
		ツタウルシ	+	サカゲイノデ	+
亜高木層		イワガラミ	+	ミズヒキ	+
ハクウンボク	+	ノブドウ	+	ミヤマカタバミ	+
ヤマブドウ	+	テイカカズラ	+	ナガバモミジイチゴ	+
		ヤブデマリ	+	オオタチツボスミレ	+
低木層		スミレサイシン	+	ジュウモンジシダ	+
リョウブ	+	クリ	+	タンナサワフタギ	+
コハウチワカエデ	+	ササユリ	+	ハウチャクソウ	+
ヤマグワ	+	スギ (実生)	+	チゴユリ	+
クロモジ	+	タチシオデ	+	ミヤマハハソ	+
アワブキ	+	ムラサキシキブ	+	サンショウ	+
		オヒョウ	+	ホドイモ	+
草本層		ハイイヌガヤ	+	アオダモ	+
エゾアジサイ	2	ムカゴイラクサ	+	ジュウモンジシダ	+
アキチョウジ	+	ニワトコ	+	ナライシダ	+
チヂミザサ	+	ヤマイヌワラビ	+	ヤマジノホトトギス	+
キバナアオギリ	+	ウリハダカエデ	+	タニタデ	+

Table 3 - 5 樹木衰退度調査結果

地点名：氷ノ山スギ林

調査機関名：鳥取県林業試験場 調査日：2004年9月15日

個体番号	1 H60	2 H61	3 H62	4 H63	5 I103	6 I90	7 H46	8 H47	9 H48	10 H49	11 H55	12 H64	13 H65	14 H56	15 H53	16 H66	17 H67	18 C40	19 H68	20 H69
	E	E	E	E	E	W	W	W	W	W	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N
樹種名	スギ	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	ミズキ	スギ	"	"	"	"	"	"	"
相対的樹高	高	高	高	高	低	中	中	中	中	中	中	中	中	中	中	低	中	中	中	中
樹高 (m)	24	23	22	20	9.2	16	17.5	17	16.5	18	17	14	17	16	18.5	11.3	16	15	14.5	14.5
胸高直径 (cm)	41.8	36.9	34.5	33.7	19.3	36.6	45.5	29.1	34.3	31.0	35.8	19.2	38.8	28.3	53.3	21.9	23.1	21.0	34.7	24.5
樹勢	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
樹形	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
枝の生長量	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
梢端の枯損	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
枝葉の密度	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
葉の変形度	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
葉の大きさ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
葉色	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
葉の障害状況	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

樹木衰退の原因推定：庇圧によるものと推定される。

3) 土壌調査

(1) 現地調査結果 (Table 3 - 6、Fig. 3 - 8)

Fig. 2 - 1、2 - 2のとおり植生調査地点と合わせて設定した2つの調査プロット(プロットⅠ、Ⅱ)とともに、土壌種は褐色森林土壌であり、1層目から順に、A1、A2、AB、B層の4層に層位分けした。その層界の形状は波状(時折不規則)で明確さは明瞭~漸変であった。

プロットⅠは深さ80cm程のところにレキ層(or風化しかけの岩盤?)があった。なお、プロットⅡは深さ120cmまで調査採掘を行ったが、これらは出てこなかった。なお、当該調査地点が針葉樹のスギ林であり、土壌表面にリター層と呼ばれる落葉の堆積層が1層目の上に5cm程度存在していた。

なお、当該調査地点が谷底でなく斜面上であるため、1層目は比較的薄いと思われる。

1層目~2層目にかけては有機物・腐植が多く集積して黒色を呈し、植物根や孔隙も多く存在していたが、深さとともに急激に減少し、漸移層である3層目を経て、4層目ではこれらは非常に少なくなった。しかし、時折樹木のものと思われる太い根が存在した。

現地調査中に、プロットⅠの1層目にはミミズが多数生息していたが、プロットⅡではほとんど見あたらなかった。

Table 3 - 6 現地調査結果(土壌断面調査)結果概要

層位	プロットⅠ	プロットⅡ	概況等
1層目	0~10cm (A1層)	0~10cm (A1層)	この層の土壌には有機物・腐植が非常に多く含まれ黒色。団粒状構造が発達し、植物の根(特に細根)及び孔隙が非常に多く、軽く柔らかい。
2層目	10~20cm (A2層)	10~30cm (A2層)	有機物・腐植が多く黒色であるが、1層目ほどではない。植物根及び孔隙についても同じ。植物根は、細根が減少し、やや大きめのものが目立つ。1層目よりも緻密度がやや高い。
3層目	20~40cm (AB層)	30~70cm (AB層)	濃茶~茶色で2層目と4層目との中間的な感じ。植物根や孔隙の量は2層目よりもさらに少ないが、大きさは大きい。
4層目	40~80cm (B層)	70~120cm (B層)	黄~茶褐色で、有機物・腐植はほとんど含まれておらず、空隙はほとんど無く緻密。当該面の土壌は、土壌構造は中程度の大きさの角塊状構造で発達程度は強。調査断面では植物根無し。

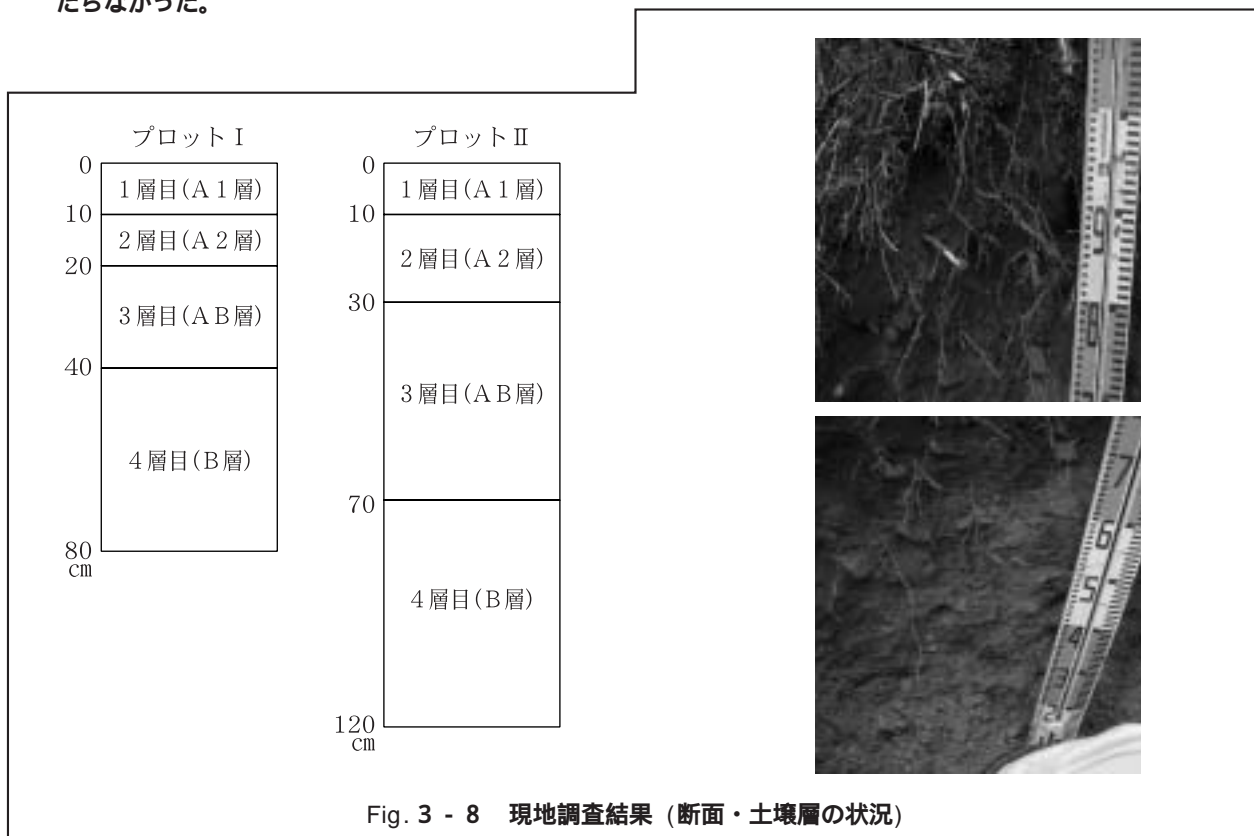


Fig. 3 - 8 現地調査結果 (断面・土壌層の状況)

(1) 化学分析結果 (Table 3 - 7、3 - 8、Fig. 3 - 9)

土壤の酸性度に係る化学分析結果を以下に示す。

Table 3 - 7 化学分析結果 (交換性陽イオン等)

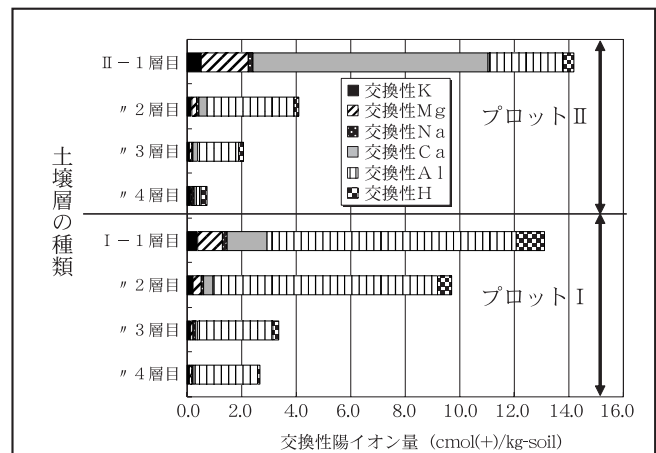
	試料名	深さ (cm)	水分含量 (%)	交換性陽イオン (塩基性)				交換性陽イオン (酸性)		合計	(Ca + Mg + K) / Al	塩基飽和度 (%)
				K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Al(OH) _n ⁽³ⁿ⁾⁺	H ⁺			
				cmol (+) / kg-soil						モル比		
プロット	中心 1 層目 (A 1)	0 ~ 10	16.8	0.37	0.94	0.14	1.48	9.18	1.01	13.13	0.52	22.4
	" 2 層目 (A 2)	10 ~ 20	14.2	0.24	0.26	0.10	0.35	8.27	0.51	9.73	0.20	9.8
	" 3 層目 (A B)	20 ~ 40	15.4	0.12	0.082	0.088	0.093	2.78	0.20	3.35	0.22	11.3
	" 4 層目 (B)	40 ~ 80	12.3	0.099	0.056	0.078	0.056	2.30	0.10	2.69	0.20	10.8
プロット	中心 1 層目 (A 1)	0 ~ 10	13.0	0.54	1.71	0.17	8.67	2.75	0.40	14.23	6.26	77.9
	" 2 層目 (A 2)	10 ~ 30	11.2	0.18	0.15	0.10	0.31	3.21	0.17	4.12	0.38	18.0
	" 3 層目 (A B)	30 ~ 70	11.2	0.098	0.062	0.072	0.15	1.50	0.20	2.09	0.41	18.5
	" 4 層目 (B)	70 ~ 120	7.5	0.12	0.047	0.077	0.094	0.19	0.19	0.72	3.04	47.2

cmol (+) / kg-土壤 = mmol (+) / 100g-土壤 = meq / 100g-土壤

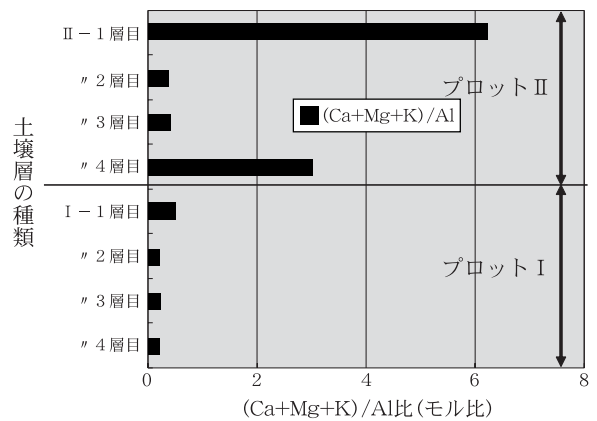
...イオンの吸着量はその電荷に依存するのでイオンの価数 (電荷数) を考慮した単位

Table 3 - 8 土壤pH測定結果 (サブプロット含む)

		試料名	pH(H ₂ O)	pH(KCl)
プロット	中心	1 層目 (A 1) 0 ~ 10	4.79	3.94
		2 層目 (A 2) 10 ~ 30	4.83	4.15
		3 層目 (A B) 30 ~ 70	4.94	4.34
		4 層目 (B) 70 ~ 120	5.13	4.75
	四角表層	- 0 ~ 10	4.86	
		- 0 ~ 10	5.25	
		- 0 ~ 10	4.87	
		- 0 ~ 10	3.79	
	四角次層	- 10 ~ 20	4.60	
		- 10 ~ 20	4.84	
		- 10 ~ 20	4.63	
		- 10 ~ 20	4.08	
プロット	中心	1 層目 (A 1) 0 ~ 10	4.37	3.46
		2 層目 (A 2) 10 ~ 20	4.50	3.75
		3 層目 (A B) 20 ~ 40	4.91	4.18
		4 層目 (B) 40 ~ 80	4.88	4.23
	四角表層	- 0 ~ 10	4.26	
		- 0 ~ 10	4.04	
		- 0 ~ 10	4.11	
		- 0 ~ 10	4.27	
	四角次層	- 10 ~ 20	4.55	
		- 10 ~ 20	4.42	
		- 10 ~ 20	4.56	
		- 10 ~ 20	4.47	



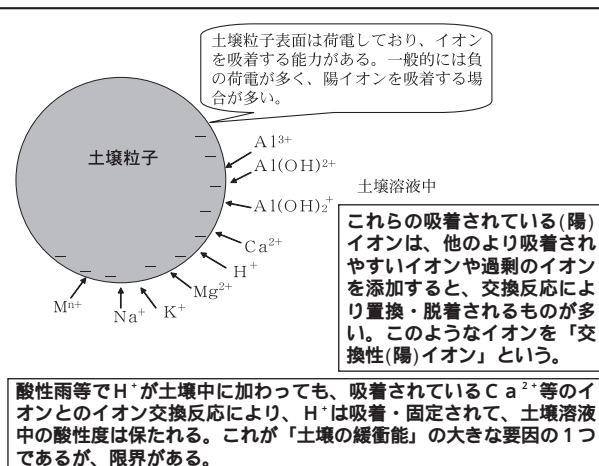
層位毎の土壌中の交換性陽イオン組成



プロット中心部土壌の交換性陽イオンの層別別 (Ca+Mg+K) / Alモル比

プロット - A 1 層を除き、どの層の土壌も塩基性陽イオン (Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺) の割合が低く、酸性陽イオン (Al(OH)_n⁽³ⁿ⁾⁺、H⁺) の割合が高く、土壌が酸性化していることが示唆された。

(Ca+Mg+K) / Al (モル比) もこれに対応 (「土壤溶液」の当該値 < 1 で植物影響の報告)。



「交換性陽イオン」について

Fig. 3 - 9 土壤の交換性陽イオン組成

水分含量

風乾物水分含量 (%) は、有機物含有量の高い表層土壌のほうが高い傾向にあった。

土壌 pH

- a) pH (H₂O) ... 表層 : 3.8~5.3 (平均4.3, n=10)、次層 : 4.1~4.8 (平均4.5, n=10)、3層目 : 4.9 (n=2)、4層目 : 4.9~5.1 (平均5.0, n=2)
- b) pH (KCl) ... 表層 : 3.5~3.9 (平均3.6, n=2)、次層 : 3.8~4.2 (平均3.9, n=2)、3層目 : 4.2~4.3 (平均4.3, n=2)、第4層目 : 4.2~4.8 (平均4.4, n=2)
- c) 8箇所のサブプロット (4箇所 × 2プロット = 8箇所、深さ 0~10、10~20cm) で、pH (H₂O) < 4 を観測した箇所もあった。
- d) pH (H₂O) は土壌溶液に溶存する H⁺ イオン濃度に対応するものであり、土壌溶液の酸性度の強さが反映されている。pH (KCl) は、KCl 環境での土壌粒子表面の吸着酸性陽イオンが置換・浸出されて溶液中の H⁺ が増加することから、値が低くなっていた(その差 pH=0.6~0.7)。
- e) どの層も酸性であったが、表層部ほど酸性度が強く、下層部の酸性度は比較的弱かった。なお、深さ80cm以深でレキ層が出現したプロットは調査した全層で酸性度が強い傾向であった。
- f) なお、表層部土壌の酸性度の強さについては、近年の酸性雨以外にも、長年の風化作用による酸性化や、有機物分解・腐植化の過程で生じる有機酸の影響も考えられる。

交換性陽イオン(土壌の吸着陽イオン)組成

土壌粒子表面は荷電しており、イオンを吸着する能力がある。一般的には負の荷電が多く、陽イオンを吸着する場合が多い。これらの陽イオンは、他のより吸着されやすいイオンや過剰のイオンを添加すると、交換反応により置換・脱着されるものが多い。これらを「交換性陽イオン」といい、土壌の酸緩衝作用の主因である (Fig. 3 - 9) ことから、これらに着目した。

- a) プロット の第1層目(- A 1層)を除き、全般的に塩基性陽イオン(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺)の割合が低く、酸性陽イオン (Al(OH)_n⁽³⁻ⁿ⁾⁺、H⁺) の割合が高かった。特にプロット で顕著であり、酸性度の強さを反映したものと見える。
- b) a) に関連して、土壌酸性化によるAlの植物等への影響を考える際によく用いられる

(Ca + Mg + K) / Al (mol比) を算出したところ、プロット - 1層目 (=6.3)、同4層目 (=3.0) を除き、0.2~0.5となった。「土壌溶液」中の当該値が1よりも小さくなると植物の生長が抑制されるとの報告がある。今回の測定結果から算出した数値は交換性陽イオン量についてのものであり、そのまま適用できないが、「土壌溶液」中へは、交換平衡 (+ 溶解平衡) の関係にあつて、土壌溶液中に容易に溶出する可能性もあることから、当該地点の植生への影響の可能性も考えられる。

- a) 酸性度が高い最表層部土壌で、塩基性陽イオンの割合が次層よりも高くなっていた(特にプロット、量としては、酸性陽イオンも高い) が、このことについては、植生(樹木、下層木・草)の作用(植物が地中下層からこれら成分を吸収。葉・茎等に蓄積 枯死して地表部に落下・堆積 腐朽・溶出 土壌に供給等)が考えられる。次段階の調査で知見を得たい。
- b) Alの影響を捉えるためには、Alの形態 (Al³⁺、Al(OH)²⁺、Al(OH)₂⁺等) による違いや、土壌有機物との錯結合形成による影響(毒性が弱まること)があることから、これらについても検討する必要がある。
- c) なお、サブプロットの交換性陽イオン組成についても分析予定。

4 まとめ

これまでの調査で、氷ノ山周辺における酸性雨の生態系への影響実態について、以下の知見が得られた。

1) 渓流水

基本的には中性で酸に対する耐性もあるが、融雪時期及びまとまった降雨時に若干影響を受ける可能性が示唆された(特に豪雨時について若干のデータを得た)。

2) 植生

樹木に庇圧によるものと思われる樹形や枝の生長の障害が確認されたが、樹木、下層植生ともに酸性雨が原因であると思われる衰退は確認されなかった。

3) 土壌

(1) スギ林内の褐色森林土壌を調査。表層を中心に酸性化しており、pH < 4 となる箇所もあり、植生への影響(衰退等)は認められていないものの、酸性度が強い状況であることが判った(特にプロット)。

(2) 土壌の酸性化には、酸性雨以外にも土壌中の有機酸

の影響等も考えられるが、これらの存在量等を把握する必要もあると思われる。

- (3) 交換性陽イオン組成は酸性陽イオンの割合が高く、これら（特にAl）の溶出による植生や水系への影響の可能性も考えられる。

5 今後の検討

毎年の気象条件による年毎の変動を押さえるとともに、酸性雨影響が長期的なものであることを踏まえ、以下の点に留意の上、継続実施していく。

1) 渓流水

これまでの調査で捉え切れていない状況（瞬間的なpH低下等）を捉える調査（連続測定等）が必要である。…現在上流部への機器設置を検討。

2) 土壌・植生

- (1) スギ林以外の広葉樹林の土壌調査や、落葉・下層植生の作用に係る知見を得るための調査（リターフォール調査等）を実施予定。
- (2) この調査で土壌の特に表層部の酸性度が強いことが判った。同じ箇所後に（例えば5年後）に同じ手法で調査を行ってデータの推移を見る予定。
- (3) この調査地点の土壌については、室内実験（土壌のみの系で人工酸性雨の継続降下、浸透水の酸性度・成分測定。約10年分の酸負荷済み）を実施し、一部で表層部での酸性化やAl溶出の可能性を示す結果が得られている（別添報告書参照）。この室内実験を継続して、20年後、30年後…といった将来予測に係る知見を得るとともに、現地での土壌浸透水調査も行って室内実験結果と比較し、データの違い（あるとすればその原因も）を検討し、緩衝作用のポイントとなる知見を得る。

- (4) 植物生理学的知見を情報収集し、植物への影響について土壌の状態（化学分析データ）と植物の状態（色・形状等）とを結び付けて判断（評価）し、影響があると判断された場合の対策にも繋げる。

参考文献

- 1) 日本化学会編：季刊化学総説No14「陸水の化学」学会出版センター（1992）
- 2) 鈴木啓助：渓流水の酸性化をもたらす融雪水，地球環境Vol. 9，p49～60（2004）
- 3) 越川昌美・高松武次郎：土壌 - 河川 - 湖沼系におけるアルミニウムの動態と化学，地球環境Vol. 9，p83～91（2004）
- 4) 中島拓男・落合正宏・伏見碩二・浜端悦治：酸性雨と渓流水，琵琶湖研究所所報第20号，p34～41（2001）
- 5) 環境省地球環境局：「土壌・植生モニタリング手引書」（2003）
- 6) 日本土壌肥料学会監修・土壌環境分析法編集委員会編：「土壌環境分析法」博友社（1997）
- 7) 農林省農林水産技術会議事務局監修・土壌養分測定法委員会編：「土壌養分分析法」養賢堂（1994）
- 8) 「土壌断面記載ガイドライン第3版（改訂版）FAO（訳・監修：農林水産省林野庁森林総合研究所）」
- 9) 環境庁地球環境部監修：「地球環境の行方 酸性雨」中央法規p89～139（1997）
- 10) 佐竹研一編著：「酸性環境の生態学 - 酸汚染と自然生態系を科学する - 」愛智出版p15～60、135～167（1999）
- 11) 佐竹研一編「酸性雨研究と環境試料分析 - 環境試料の採取・前処理・分析の実際 - 」愛智出版p92～114（2000）