

C-3 酸性物質の臨界負荷量に関する研究

(2) 土壌における臨界負荷量に関する研究

② 森林土壌における酸性物質の臨界負荷量の評価に関する研究

研究代表者 森林総合研究所 堀田 庸

農林水産省 森林総合研究所

森林環境部	養分動態研究室	溝口岳男・西本哲昭・奈良一秀 赤間亮夫・長倉淳子
	土壌化学研究室	石塚和裕・的場節子・阪田匡司
九州支所	土壌研究室	酒井正治・稲垣昌宏・大貫靖浩

平成5～7年度合計予算額 40,869千円

(平成7年度予算額 13,739千円)

[要旨] 塩基欠乏土壌でスギを育苗し樹体内の塩基濃度の季節変動を調べたところ、苗における塩基濃度のうち、カリウムがもっとも土壌中での濃度差を反映していた。次にスギ・ヒノキ・イヌエンジュ苗を低カリウム土壌で栽培し、乾燥ストレス下で光合成速度と気孔コンダクタンスの推移を調べたところ、スギでは低カリウム土壌の苗の方が乾燥に伴う光合成速度の低下および気孔閉鎖が遅かった。また関東周辺の社寺林のスギ・ヒノキ成木の葉中塩基濃度と土壌の交換性塩基濃度との関連を調べたところ、スギでは衰退度の高いところでは葉中のカリウム濃度が低いか、土壌中の交換性カリウム濃度が低いという傾向が見られた。土壌の酸性化の実態と土壌酸性化が根系の展開様式、量などに及ぼす影響をポット栽培試験から解析した。スギ、ヒノキの針葉樹では、pH 4前後の極めて酸性化した樹幹流が常に幹回りの土に流れる結果、スギ、ヒノキで幹回りの土が酸性化していた。さらにヒノキ林では細根が表層に集中分布する傾向にあり、スギに比べて土壌酸性の影響を受けやすい森林生態系であるといえた。約1年半にわたり、ポット苗に硫酸酸性の人工酸性雨 (pH 2) を合計ポットあたり18750 ml 散布した結果、人工酸性雨散布の影響はポット上層 (0~10cm) 土壌の酸性化となって現れたが、スギ、ヒノキの両樹種とも地上部に顕著な影響は認められなかった。森林土壌における酸性物質の臨界負荷量を明らかにするため、臨界負荷量推定に必要な情報の整理と検討を行った。日本の森林土壌には既に交換性アルミニウムが多い強酸性土壌が多く認められ、アルミニウム溶出を臨界点とするにはすでに臨界を越えたものが多い。酸緩衝能の予測には交換性塩基量が最も有効であるが、酸緩衝能の基準となる交換性塩基量の全国的なデータが少なく、土壌の  $Y_1$  や容積重を用いた土壌区分がデータ量としても有効である。森林土壌の酸性度は最表層の地質条件である第四紀の火山灰降下との関連が認められる。広域の評価を行うには立地情報としての国土数値情報のメッシュサイズをさらに検討すべきである。

[キーワード] 酸性降下物、臨界負荷量、塩基欠乏、樹幹流圏土壌、土壌緩衝能

## 1. 序

酸性雨は広域汚染であり、森林生態系に与える影響は蓄積的・慢性的である。被害を未然に防ぐために精度の高い影響予測手法の確立が強く要望されている。しかしながら、森林生態系は多様な生物より構成されており、生態系内外の物質循環・収支も複雑である。また、土壌の酸に対する緩衝能の発現機構も複雑である。本研究では植物生理学的手法、土壌化学的手法及び土壌生態学的手法を用いて森林土壌における酸性物質の臨界負荷量を明らかにする。

## 2. 土壌中の塩基欠乏と樹木の生理活性

土壌の酸性化に伴う土壌からの塩基溶脱が樹木の成長や健全性にどのような影響を及ぼすのかについては未だ不明な点が多い。そこで、本研究では、1) 土壌塩基を人為的に調整して育苗することにより樹木中の各種塩基濃度の季節変化、樹体内での配分パターン、成長・形質などへの影響等を明らかにし、2) 塩基のうち K の濃度の低い土壌で3種の樹木を育苗して成長・形質に及ぼす影響を調べるとともに、苗に乾燥ストレスを与えて樹木の生理に与える影響を明らかにし、3) 最後に様々な程度の樹木衰退が見られる関東の社寺林において土壌中の塩基濃度およびスギ・ヒノキ成木の葉の塩基濃度を調査し、その関連性を見た。

### (1) 塩基欠乏土壌におけるスギ苗中の塩基濃度の季節変化

#### ①研究目的

塩基濃度の低い土壌に植栽されたスギ苗樹体内の塩基濃度がどのような季節変化を示すかを明らかにする。また、低塩基条件下での苗の成長、養分分布等の違いを調べる。

#### ②研究方法

スギ大径木の根株付近から塩基の乏しい表層土壌を採取し、4mm のふるいを通した後、K、Ca、Mg の3元素の塩を全て、もしくは2種のみ添加し、よく混和した。塩を与えなかった区を対照とした。また全区に均等量の N、P を与えた。その後、土壌を園芸用のプランターに詰め、1カ月間ガラス室内で養生した後4月末に1年生スギ播種苗を植え込んだ。植栽本数はプランター1個あたり12本、各区3回繰り返した。苗が定着し新梢が伸びはじめた6月から11月まで毎月各プランターから1本ずつの苗を掘り取り、地下部と地上部の生重量と乾燥重量、苗高、根元径を測定した。乾燥した苗のサンプルは湿式灰化し、K、Ca、Mg、P、Al の濃度を求めた。また苗の採取時にプランターの土壌も採取し、交換性塩基濃度を測定した。さらに、実験土壌を得た林分とスギ衰退の見られない茨城県茎崎町の民家屋敷林からそれぞれスギの枝葉と土壌のサンプルを毎月採取し、プランター苗のサンプルと同様に分析を行った。

#### ③実験結果

苗の成長量に処理区間で明確な差は見られなかった。苗に含まれる塩基要素のうち K の濃度は土壌中の交換性 K 濃度をよく反映していた。苗中の K 濃度は新葉の展開時に高くその後徐々に低下し、Ca 濃度は蓄積傾向を示し、Mg 濃度はほぼ一定であった(図-1)。K を与えなかった区の苗では Mg の濃度が高くなる傾向が見られた。野外サンプルでは2地点とも葉中 K 濃度が低かった。各塩基の濃度の推移はほぼ苗と同様であった。2地点間で葉中の塩基濃度に大きな差はなかったが、K 濃度に対する Mg 濃度の比が衰退地の個体では高くなっていた。P および Al に関しては処理による特定の傾向は見られなかった。

#### ④考察

調整した塩基のうち、K に関しては土壤中の濃度低下に従って植物体中では処理区間の濃度差が顕著に広がっていたが、一般に森林土壌における交換性塩基は  $K > Mg > Ca$  の順に溶脱しやすいと言われており、また植物体中での移動がもっとも速やかに行われるのは K であることが知られている<sup>2)</sup>。従って当実験での結果はそうした土壌・植物体中の K の挙動をよく反映したものと言える。

(2) K 欠乏土壌におけるスギ・ヒノキ・イヌエンジュ苗の成長・養分吸収と乾燥ストレス下における生理的反応

#### ①研究目的

K を調整した土壌でスギ・ヒノキ・イヌエンジュを育苗し、成長、養分吸収への影響を見るとともに、苗に乾燥ストレスを与えた場合に光合成や蒸散などの生理にどのような影響が現れるのかを調べる。

#### ②研究方法

2mm, 4mm のふるいを通して粒径を揃えた桐生砂を粒径 2mm の石英砂と体積比で 1:1 に混合し、脱イオン水を 10 分間流して土壌中の塩基量を低減させた。その培土を 1/10,000a のワグネルポットに詰めて、4 月下旬にスギ・ヒノキの 1 年生苗をポット当たり 1 本ずつ植え付けた。イヌエンジュは当年発芽した幼苗をポットあたり 2 本ずつ移植した。苗の定植後、ポットを同数ずつ 2 区に分け、一方には K を含む液肥を、もう一方には含まない液肥を与えた。K 施肥区、K 無施肥区それぞれ樹種ごとに 4 回繰り返した。栽培はガラス室内で行い、4 カ月後に昼夜温 30℃一定、光量子密度  $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の条件の人工気象室に移し、同時に灌水を停止した。灌水停止後 1, 4, 7, 11, 14, 17 日後の午前と午後にそれぞれ光合成速度および蒸散速度を測定した。灌水停止後 21 日目に再度十分な灌水を行い、さらに 10 日間育苗したのち収穫した。収穫した苗は苗高、地上部・地下部の生重量および乾燥重量を測定し、湿式灰化後 K, Ca, Mg, P の濃度を測定した。また光合成速度および蒸散速度を測定する時に使用した枝は測定部位を切り取って乾燥重量を求め、気孔コンダクタンスの算出を行った。

#### ③実験結果

K 無施肥区のスギ苗は根の発達が K 施肥区に比べやや劣っていた。K 無施肥区の苗はスギで 50%以上、ヒノキで 30%、イヌエンジュで 20%ほど K 施肥区の苗より葉中 K 濃度が低くなっていた。その他の養分要素には有意な濃度差は見られなかった。スギの場合 K 無施肥区の苗は、乾燥ストレスに伴う光合成速度の低下および気孔閉鎖が K 施肥区に比べて遅れる傾向が見られた(図-2)。また、ヒノキでは光合成速度、気孔コンダクタンスとも常に K 無施肥区の苗が K 施肥区の苗を上回っていた。

#### ④考察

K 無施肥区のスギ苗では乾燥ストレスに伴う気孔閉鎖、光合成速度の低下が K 施肥区の苗に比べ遅れる傾向を示した。K は気孔の膨圧調整に関与し、また不足すると代謝系の乱れからストレスに対する反応が異常になると言われている<sup>1)2)</sup>。今回の結果はそれを裏づけるものと考えられる。-K 区のスギ・ヒノキ・イヌエンジュ苗もいずれもスギ同様に光合成速度が高かったことから、これらの樹種でも K の不足が生理的な部分に影響している可能性がある。

(3) 関東周辺の社寺林における土壌中交換性塩基濃度およびスギ、ヒノキ大径木の葉中塩基濃度の調査

#### ①研究目的

様々なスギの衰退が見られる関東周辺の社寺林において表層土壌の交換性塩基濃度と社寺林内のスギ、ヒノキ（もしくはサワラ）大径木の葉中養分濃度との関連を調査し、土壌における塩基の状態が樹木にどのように反映されるかを明らかにする。

#### ②研究方法

群馬・埼玉・千葉のスギの大径木を有する社寺林 10 カ所において土壌およびスギとヒノキ・サワラの地上 5～7 m の高さの当年葉を採取した。また葉のサンプルを採取した近辺から土壌サンプルを採取した。採取した葉のサンプルは当年生の部分のみを湿式灰化し、K, Ca, Mg の濃度を測定した。土壌は風乾したのち交換性塩基濃度の測定を行った。これら土壌、植物体の分析結果をすでに同様の調査を実施した群馬・千葉・茨城の 5 カ所の社寺林の調査結果と合わせて検討を加えた。

#### ③調査結果

各調査地の土壌中の交換性 K とスギ葉中の K 濃度との関係を見ると（図-3）、衰退が見られる地点は交換性 K が多いにも関わらず葉中の K 濃度が 0.5%以下と低いところと元来交換性 K が少なく葉中濃度は 0.5～0.7%のところの 2 群に大別された。Ca は土壌中、葉中濃度とも調査地間の差が非常に大きく、Mg も交換性 Mg の濃度は調査地間に大きな違いが見られた反面、葉中濃度にはほとんど差が見られず、いずれも特定の関係は見いだせなかった。ヒノキは K に関してはスギよりやや濃度が高くサンプル間の濃度差が小さい傾向が見られた。

#### ④考察

今回の結果からは、スギの衰退が進行しているところでは土壌中の K のレベルと葉中 K 濃度との間に何らかの関係があるように思われる。すなわち衰退地では土壌中の交換性 K がもともと低濃度である場合と、土壌中の交換性 K はそこそこあるにも関わらず樹体内の K 濃度が低い場合があるようである。こうした関係を裏付けるためにはさらに多くの調査例を集めるとともに、土壌の種類、溶脱の程度、塩基種のバランスなどでケース分けを行い、個別に評価していく必要がある。

### 3. 土壌の酸性化の実態と酸性土壌における根系の反応

酸性降下物は樹木の葉、枝、幹などに補足され、吸湿して酸性を示すとともに、降雨時に雨水に溶出し、林内雨、樹幹流となって土壌に入る。これらの林内雨および樹幹流の成分特性は樹種依存性が極めて高いことが多くの研究で明らかにされつつある<sup>3)・4)</sup>。例えば、人工林の主要な樹種であるスギやヒノキの樹幹流が pH 4 以下の強い酸性度を示す。従ってこれらの樹種では降雨時には酸性化した樹幹流が常に幹回りの土壌に流下しているため、幹回りの土壌を酸性化し、アルミニウムなどが溶出して、樹木の衰退を引き起こしているのではないかと懸念されている。本研究では、主にスギ、ヒノキの針葉樹林とコジイの常緑広葉樹林の 3 林分で土壌の酸性化の実態および表層の細根量の実態を調査することと同時に、ポットを使って土壌酸性化が根系の展開様式、量などに及ぼす影響を調査することを目的とした。

#### (1) 土壌の酸性化の実態

##### ①研究目的

樹幹流が土壌に与える影響を調べるため、スギ、ヒノキ、コジイ林の樹幹流圏土壌の分布特性

を樹種毎に明らかにする。さらに、スギ、ヒノキ、コジイ、マツ林の表層土壌の土壌特性と細根量の比較検討を行う。

## ②研究方法

ア 立田山実験林内の近接する4林分（スギ、ヒノキ、マツ、コジイ林）において、表層土壌（0-5 cm 及び 10-15cm）を採取し、化学性  $\{pH(H_2O)$ 、 $pH(KCl)$ 、交換酸度 ( $Y_1$ )  $\}$  および A<sub>0</sub>層および表層下30 cm までの細根量を測定した。

イ 立田山実験林内の3林分（ヒノキ、スギ、コジイ）において、幹の回りの2 m x 2 m 枠内の表層土壌（0-5 cm 及び 10-15cm）を50 cm メッシュの交点および幹回り8点で100 ml 容採土円筒を用いて各林分、各表層ともそれぞれ計32サンプルを採取した。ここではこれを樹幹流圏土壌と呼ぶ。風乾後、これらの土壌サンプルの  $pH(H_2O)$  を測定した。

## ③結果と考察

ア ヒノキ林土壌は0-5、20-25 cm 層とも、pHは低かった（表-1）。一方、高いpHはスギ0-5 cm で認められた。これは、サンプル採取場所として酸性度が高いと考えられる樹幹周囲を避けたこと、スギ林内雨のpHは比較的高いこと、林床には雨水の酸性度を弱める厚いA<sub>0</sub>層が発達していることが原因であると考えられた。また、マツ及びコジイ林に比べて、スギ及びヒノキ林では細根量は比較的少なかった。特にヒノキ林では最表層0-5 cm の層に $\phi$ 1 mm 以下の特に細かい根が集中分布していた（表-2）。これらのことはヒノキ林では低いpHを示す土壌中により細かい細根が集中分布するため、土壌酸性化による影響の度合いが高いことを示唆していた。

イ 針葉樹のスギ、ヒノキで幹回りの土が酸性化しており（図-4）、pHの低い樹幹流が土の酸性化を促進していた。ヒノキ林では深さ0-5 cm の鉱質土壌表層全体で低いpHを示すのに対して、スギ林では幹回りが特に低いpHを示した。さらに、10-15 cm においても、ヒノキ林ではスギ林に比べて低いpH土壌が広く分布した。これらのことは、ヒノキ林の土壌の酸性化がスギ林より広く、しかも深くまで進んでいることを示唆していた。スギ、ヒノキ、コジイ林で平均pHはそれぞれ4.3、4.0、4.4となり、ヒノキ林の樹幹流圏土壌のpHはスギ、コジイ林に比べて極端に低い値をとった。

## (2) 酸性土壌における根系の反応

### ①研究目的

酸性度の異なる土壌で育成したスギ苗ポットに硫酸酸性の人工酸性雨を添加し、土壌の酸性化と根系の伸長、形態、生理活性に与える影響を明らかにする。なお、ヒノキ苗についても一部分試験を行う。

### ②研究方法

スギ、ヒノキ苗木（2年生）を1/5000 aワグネルポット（深型）に植え付け大型ガラス室内で育成した。供試土壌はスギ苗については中性土壌および強酸性土壌の2種類、ヒノキ苗については中性土壌の1種類であった。これらのポットに硫酸酸性溶液（ $pH=2$ ）を週1-2回あるいは隔週に250 mlを散布した。なお、対照として脱イオン水を散布するポットを設けた。約1年半でポットあたり合計18750 mlの硫酸酸性溶液を加えた。また、月に1-4回土壌水分調整（35%）を行った。なお、各ポット苗の高さおよび直径（地表面より5 cm 高さ）は各季節毎に測定した。地上部のバイオマスは幹および枝葉にわけ乾燥重量（60℃）として算出した。

土壌を表層から 0-10 cm, 10-20 cm 及びそれ以深の 3 層の土壌に分け採取した。これらの一部の土壌を風乾し、土壌 pH, EC,  $Y_1$ , CEC, 置換性 Al, 置換性陽イオンを測定した。残りの土壌から水洗で丁寧に根を取り出し、根を直径サイズ別 (1-2 mm, 2-5 mm, 5 mm 以上) にわけ、乾燥重量 (60℃) を算出した。なお、水洗した根の一部を用いてワールブルグ検圧法に従い、根の呼吸活性を測定した。

### ③結果と考察

#### ア ポット土壌の酸性化

表-3 に人工酸性雨散布試験後の深さ別の土壌の化学性を示した。人工酸性雨を散布したポットの上層 (0~10cm) 土壌の pH は酸性土壌で 4.8 から 3.6、中性土壌で 6.7 から 4.0~4.2 へ極端に酸性化した。中層 (10~20cm) 土壌は酸性土壌で酸性化が認められたが、上層ほどではなかった。下層 (20cm 以深) 土壌の化学組成は Na を除き供試土壌のそれとほぼ同じで人工酸性雨の影響は小さかった。Na 濃度が増加した原因はリン不足を補うためにリン酸ナトリウムをポットに添加したためである。脱イオン水を散布したポット土壌は上層 (0~10cm) 土壌で pH が多少高い傾向があったが、中層、下層土壌は供試土壌の化学性と大きな違いはなかった。

#### イ 地上部の成長比較

各ポット苗の高さおよび直径の季節変化から (図-5)、ヒノキ、スギのいずれも人工酸性雨を添加することによって地上部の成長が極端に悪くなる現象は認められなかった。

#### ウ 地下部のバイオマス

酸性雨処理に関わらず直径 1 mm 以下の細根が最も多く、全量に占める割合はスギ苗で約 80%、ヒノキ苗で約 65% であった (図-6)。また、酸性土壌の根量は中性土壌のその約 1.5 倍多かったが、酸性雨処理による違いはほとんど認められなかった。

#### エ 根の呼吸活性

中性土壌でスギを栽培した場合、散布水の種類に関わりなく、根の呼吸速度はほぼ同じであった (図-7)。一方、酸性土壌を使ったスギポットでは根の呼吸速度は中性土壌を使ったスギポットより広い幅をもち、脱イオン水散布ポットより人工酸性雨散布ポットのほうが多少高い傾向にあった。このことはより酸性化した土壌で現在根への影響が現れることを示唆しているが、前述の通り現在の所、地上部への極端な影響は現れていない。

## 4. わが国の森林土壌の特性と臨界負荷量

欧米をはじめ世界的な問題である酸性雨は日本においても観測され<sup>7)</sup>、森林衰退との関係が指摘されている。日本においても土壌影響予察図<sup>8)</sup>や土壌の緩衝能区分<sup>9)</sup>が行われ、欧州では臨界負荷量地図による危険度の判定も試みられている<sup>13)</sup>。吉永ら<sup>11)</sup>は、国土数値情報(土壌・表層地質)ほかのデータを用いて感受性分布図を作成した。新藤ら<sup>12)</sup>は、定常モデルによる臨界負荷量の予測を行っている。しかし、広域での臨界負荷量の予測には土壌や植生への影響に関する基本的なデータの蓄積が乏しく、モデルによる予測が現実を反映しているかの検証が行えない。

そこで国土数値情報を用いた全国規模での臨界負荷量の推定を行う際に不可欠な林野土壌調査データの整理と、立地環境別に土壌の特性値を求めることを試みた。その際に森林土壌に対する緩衝能<sup>9)</sup>を参考にして土壌区分の精密化を図ることとした。

### (1) 研究目的

全国規模での臨界負荷量の推定に必要な林野土壤のデータを集積し、代表的な林相、土壤、表層地質条件別に立地情報を解析する。全国規模で森林生態系への臨界負荷量を推定するさいの基礎となる国土数値情報、自然環境保全基礎調査データの集約整理を行い、特定の小地域を対象に土壤の分布や特性値との比較を行う。土壤試料の化学的な酸緩衝能を測定することで、生態系が許容できる土壤に対する酸の臨界点を推定するのに必要なデータを集積する。

## (2) 研究手法

全国規模の臨界負荷量推定のための立地環境データベースを作成するため、林野土壤調査報告書(総計 331 報)を整理し<sup>10)</sup>、各事業区毎に出現するすべての土壤型について1地点を選んだ(全国 2164 地点)。各調査地点の林相、標高、表層地質、土壤型と土壤理化学性(表層(0-10cm)と次層(20-30cm)の pH,  $Y_1$ , 全炭素、全窒素、容積重)をデータベース化し、統計処理によって全国を対象にした土壤型毎の特性解析を行った。

土壤条件で特徴のある長野・岐阜・愛知県にまたがる中部地域と茨城・栃木にまたがる関東地域各約 100km 四方を選んで国土数値情報と土壤データベースの突き合わせを行った。1km の国土数値情報の中から土壤型、表層地質、地形、標高植生、降水量平均気温暖かさの指数蒸発散量等のデータを切り出し、位置情報を組み込んだ営林局土壤調査データとともに地域の特性を明らかにした。

現地調査では土壤 pH が特に低いと思われる木曾地域の森林土壤から表層土壤を採取し、土壤化学性および土壤カラムによる酸溶液連続散布装置を用いて土壤の酸緩衝能を実験的に測定した。緩衝能の測定には  $\phi$  40mm  $\times$  40mm の土壤カラムに 100ppm 硫酸 (pH2.8、0.2meq/L) を 20hr、1.5meq 程度散布し、浸透液の pH の経時変化を連続記録するとともに、溶出する成分を併せて分析した。なお、酸性雨等森林モニタリングで得られた土壤試料 (84 点) を用いて同様の解析を行い、土壤の酸緩衝能と土壤の化学性について比較検討した。

## (3) 結果と考察

林野土壤調査報告から作成した立地環境データベースの調査点を土壤型で区分すると、褐色森林土 1395 地点、ポドゾル土 296 地点、黒色土 251 地点などである。日本の森林土壤の表層土壤の平均値は pH( $H_2O$ ): 4.93、pH(KCl): 4.18、 $Y_1$ : 20.2 で、全般に強酸性であり、交換性アルミニウムが多く含まれている。強酸性を示すのはポドゾル土や乾性褐色森林土に多く、湿性褐色森林土や黒色土では平均の pH( $H_2O$ )が 5 以上である(表-4)。pH( $H_2O$ )の平均値は営林局別には名古屋と長野、植生別にはブナ、その他の常緑針葉樹とヒノキ林、表層地質では凝灰岩、花崗岩で低く、逆に北海道、九州と東京、常緑広葉樹、スギ、石灰岩などで高い傾向が認められる。ところが、データの平均値に対してその変動係数は pH 以外では 50%以上を示し、各土壤型や亜群間で有意な差が認められない。森林立地情報としての土壤型区分は、土壤緩衝能の推定のために必要な特性値になりがたい。

土壤の酸性度に地域的な特徴が認められたことから、日本第四紀学会<sup>9)</sup>を参考に第四紀に火山灰が降下した地域を類別した。降下地域は北海道南部、北東北、関東、九州地域で、pH( $H_2O$ )の地域傾向と一致している。全国の平均値では表層の  $Y_1$  が降下地域で 15 に対して非降下地域では 25 と大きな違いがみられた。しかし、黒色土であっても pH( $H_2O$ )が 4 以下の強酸性を示す例もあり、降灰と土壤生成の経過時間によって表層土壤の化学性は変化している。

土壤の理化学のデータからコンピュータプログラム: Systat を用いてクラスター分析を行った

ところ、土壌の化学性成分として  $Y_1$ 、容積重と全炭素量による区分が有効であった。 $Y_1$  では交換性アルミニウム、容積重は火山灰の影響、全炭素量は腐植物質の集積等との関係が認められる。表層と次層の  $Y_1$  と容積重を用いて 12 に区分すると、989 地点が  $Y_1$  の小さい第 2、3 グループ(表層次層とも平均 4-7)となった(表-5)。このグループには土壌区分で湿性褐色森林土  $B_D$ 、 $B_{D(d)}$ 、 $B_E$  や黒色土  $Bl_D$  などが多く含まれる。第 4、5 のグループには  $Y_1$  が 30 前後で、土壌型では乾性褐色森林土や  $B_B$  や乾性ポドゾル土  $P_D$  が多い。同じく  $Y_1$  が極めて大きい(60 以上)ものは第 6、7、8 のグループとなり、表層の  $pH(H_2O)$  は平均でも 4.2 である。

国土数値情報における土壌分類については、分類されている 49 区分のうち類似している区分を統合して 17 区分にした。森林に多く出現する土壌型に限れば、褐色森林土、赤黄色系褐色森林土、ポドゾル土、赤黄色土、黒ボク土(黒色土)、未熟土ほかである。中部地域は南と中央アルプスの一部、御岳山から美濃加茂市に至る地域で、花崗岩・流紋岩・堆積岩が広く分布し、強酸性のポドゾル土や黒色土も一部分布する。関東地域では標高が相対的に低く、安山岩質火山、花崗岩や第四紀が広く分布し、低地では火山灰の影響から黒色土の分布が広い。山地のデータは少ないが、褐色森林土でも降下火山灰の影響が土壌の化学性に現れている。両地域を比較すると表層土壌の  $Y_1$  や  $pH(H_2O)$  は両者に大きな違いがあり、標高の差だけではない。中央アルプスから木曾山地では酸性土壌の分布が広いとは言え、 $Y_1$  の小さい酸性の弱い土壌の分布も重なり合いながら分布している(図-8)。山地における土壌分布は細かい地形の特性に依存しており、化学特性や緩衝能の特性は必ずしも同一に変化しているとはいえない。国土数値情報を用いてデータ処理する際に一定の情報の整理が必要と考えられる。

木曾地域から採取した土壌を化学分析した結果は、表層土壌の  $pH(H_2O)$  は 3.84-4.98、 $pH(KCl)$  は 3.29-4.04 とかなり低く、特にヒノキ天然林で低い。ほとんどの土壌型で次層より表層の方が低い  $pH$  を示し、酸性化の傾向が認められる。交換性塩基は 0.16-2.02meq/100g と非常に低く、塩基飽和度が 2% 前後であった。ヒノキ林では土壌型に関わらず硫酸散布前にすでに約  $pH4.2$  で、酸散布直後に  $pH$  は低下し酸緩衝能はほとんどみられない。ヒノキ林以外では硫酸散布直後で若干の  $pH$  上昇がみられ、その後低下し  $pH4$  前後で安定した。アルミニウムの溶出が著しくなる  $pH4.2$  にまで低下させるのに必要な酸の量を土壌の酸緩衝能とし、土壌  $pH$  および交換性塩基と比較したところ、強酸性の土壌では  $pH$  と弱い正の相関が見られたが、交換性塩基とは明確な傾向は認められなかった。

採取済みの土壌試料(84 点)を用いて酸の緩衝能と塩基の流出を測定した。実験 1 日の酸の散布ではおよそ 2mol(+)kg-1 の酸が負荷される計算になるが、その間に急激な  $pH$  低下がみられたのは 49 点にすぎなかった。交換性塩基の少ない、同じくアルミニウムの多い土壌では始めから  $pH$  が低く、 $pH$  の低下は緩慢で、アルミニウムの溶出が激しい。逆に交換性塩基の多く含まれる土壌では塩基の流出のみでアルミニウムの流出がなく、 $pH$  も高いままであった。 $pH4-6$  に現れる  $pH$  緩衝作用から  $pH$  の低下が始まるまでを酸緩衝能とし、土壌の化学性と比較したところ、交換性塩基量と概ね相関があることが認められた(図-9)。土壌  $pH$  や  $Y_1$  と比較すると相関があまり良くない(図-10)。土壌型別に比較すると未熟土や赤色土、黄色土、赤黄色系褐色森林土では交換性塩基量よりも若干少ない量の緩衝能となっていた。これはアルミニウムが溶出しやすいためと思われる。この実験で酸緩衝作用が現れたものと、現れなかったものを酸緩衝能の強度としてみると、交換性塩基による区分だけでなく  $Y_1$  もデータとして有効である(図-11)。母材の比較



を行ったが関係は見いだせなかった。

## 5. まとめ

塩基欠乏土壌で育苗したスギ苗における葉中塩基濃度のうち、カリウムがもっとも土壌中での濃度差を反映していた。低カリウム土壌で栽培したスギ苗は、乾燥に伴う光合成速度の低下および気孔閉鎖が遅かった。関東周辺の社寺林のスギでは、衰退度の高いところでは葉中のカリウム濃度が低いか、土壌中の交換性カリウム濃度が低いという傾向が見られた。

スギ、ヒノキの針葉樹では、pH 4 前後の極めて酸性化した樹幹流が常に幹回りの土に流れている結果スギ、ヒノキで幹回りの土が酸性化していた。ヒノキ林の土壌の酸性化がスギ林より広く、しかも深くまで進んでいた。さらにヒノキ林では、栄養分の吸収に最も重要な役割を果たす細根が土の浅い部分に集中分布した。このように樹幹流による土壌の酸性化の観点からみると、ヒノキ林はスギ林に比べて脆弱な生態系である林であるといえた。

樹幹流による土壌の酸性化が今後どのように促進され、また樹木にどのような影響を与えるかを調べるため、ポット苗を使って人工酸性雨散布試験を行った結果、スギ、ヒノキの両樹種とも地上部、地下部に顕著な影響は認められなかった。

国土数値情報を利用して森林の臨界負荷量を推定するには、以下のことを考慮に入れる必要がある。日本の森林土壌は既に交換性アルミニウムが多く、アルミニウム溶出を臨界点とするにはすでに臨界を越えたものが多い。強酸性下で多くの森林が成立している。酸緩衝能の予測には交換性塩基量が最も有効であるが、緩衝能の基準となる交換性塩基量の全国的なデータが少ない。土壌の特性としては  $Y_1$  や容積重を用いた土壌区分がデータ量としても有効である。森林土壌の酸性度は国土数値情報では得られない最表層の地質条件である第四紀の火山灰降下との関連が認められる。広域の評価を行うには立地情報としての国土数値情報のメッシュサイズをさらに検討するべきである。今後は生態系モデルを基礎とした臨界負荷量予測に重点を置く必要がある。

## 6. 参考文献

- 1) Hewitt, E. J. & Smith, T. A. (鈴木米三・高橋英一訳) : Plant mineral nutrition. (植物の無期栄養) 264p.、理工学社、(1979)
- 2) 村山 登ほか：作物栄養・肥料学、296p、文永堂、(1984)
- 3) 松浦陽次郎：樹幹流と土壌の酸性化の実態、森林立地、34 (1)、p20-25、(1992)
- 4) 酒井正治・大貫靖浩・藤本潔：コジイ、スギ、ヒノキ林における酸性雨モニタリング-1992.6 ~1993.7-、日林九支研論集、p47、(1994)
- 5) 石塚和裕：酸性降下物に対する土壌緩衝能の実態と評価、森林立地、34、p26-35、(1992)
- 6) 環境庁：酸性雨の土壌への影響予察図、(1984)
- 7) 環境庁：第2次酸性雨対策調査結果、pp78、(1994)
- 8) 日本第四紀学会：日本第四紀地図、東大出版会、(1987)
- 9) 日本土肥学会：酸性雨による土壌影響調査、(1988)
- 10) 日本の森林土壌編集委：日本の森林土壌、日林協、(1983)
- 11) 吉永秀一郎ほか：国土数値情報を用いた酸性雨に対する感受性分布図の作成、土肥誌、65(5) p565-568、(1994)

- 12)新藤純子ほか：酸性降下物の臨界負荷量の概念と推定法の評価、環境科学会、8(1)、p59-69、(1995)
- 13)UN/ECE： Mapping Critical Loads for Europe、86pp、(1991)

## 7. 発表業績

- 溝口岳男・奈良一秀：塩基欠乏土壌におけるスギ苗の成長および植物体中養分濃度の季節変動。第105回日本林学会大会講演要旨集、277p、1994.
- 溝口岳男・奈良一秀：スギ・ヒノキ苗の成長、葉中養分濃度、生理活性に及ぼす低カリウム土壌の影響。第107回日本林学会大会講演要旨集、92p、1996.
- M. SAKAI, Y. ONUKI, K. FUJIMOTO： The effects of throughfall on soil acidity of temperate forests in Japan. The VI international congress of Ecology, 1994
- 稲垣昌宏、酒井正治、大貫靖浩：森林土壌の酸性化と林分比較、日本林学会九州支部研究論文集、48、149-150、1995
- 稲垣昌宏、酒井正治、大貫靖浩：樹幹流による表層土壌の酸性化、平成6年度森林総研九州支所年報、18、1995
- 酒井正治、稲垣昌宏、大貫靖浩：林内雨圏土壌と樹幹流圏土壌におけるpH比較、平成6年度森林総研九州支所年報、23、1995
- M. SAKAI, M. INAGAKI, Y. ONUKI： Comparative studies on chemistry of stemflow in three temperate forests in Japan, The 5th International Congress on Acid deposition, 1995
- M. INAGAKI, M. SAKAI, Y. ONUKI： The effects of organic carbon on acid rain in temperate forests in Japan, The 5th International Congress on Acid deposition, 1995
- 的場節子・石塚和裕：酸性雨臨界負荷量の推定（Ⅰ）土壌型別の化学特性、日林関東支部大会論文集 p93-94 (1995)、
- 的場節子・阪田匡司・石塚和裕：酸性雨臨界負荷量の推定（Ⅱ）—中部山岳地における土壌の緩衝能— 106回日林学会講演要旨集 p176 (1995)、
- 阪田匡司・石塚和裕：酸性雨モニタリング調査地土壌のpH緩衝能 106回日林学会講演要旨集 p168 (1995)、
- 阪田匡司・石塚和裕：酸性雨モニタリング調査地土壌のpH緩衝能Ⅱ 107回日林学会講演要旨集 p110 (1996)

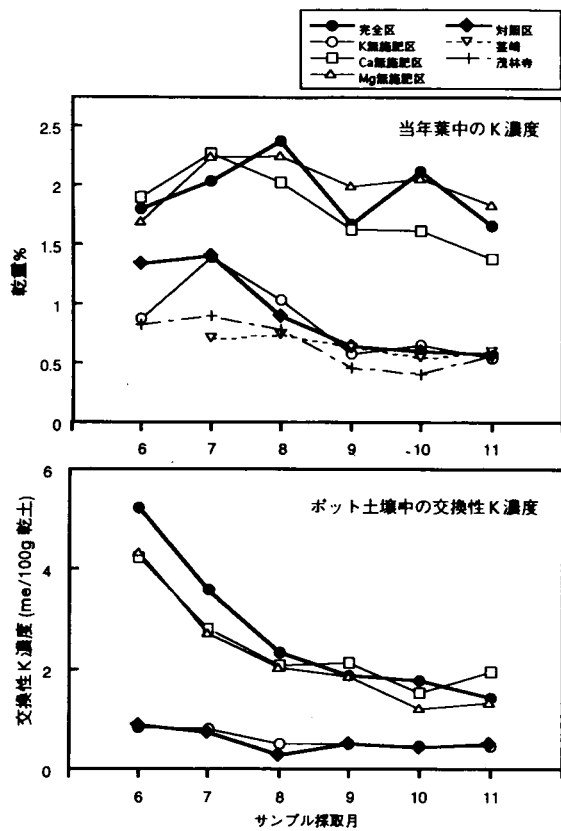


図-1 実験期間中のスギ苗中のK濃度およびポット土壤中の交換性K濃度の経時変化

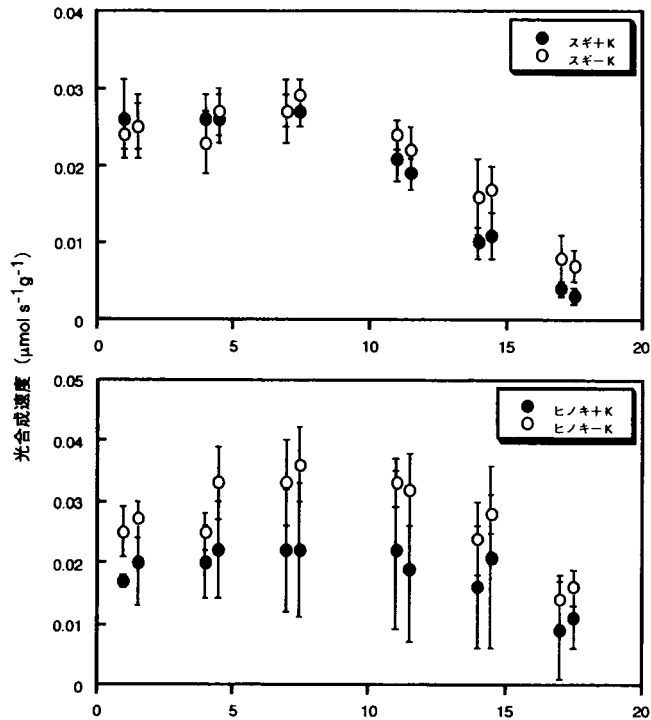


図-2 スギ・ヒノキ苗の乾燥に伴う光合成速度変化

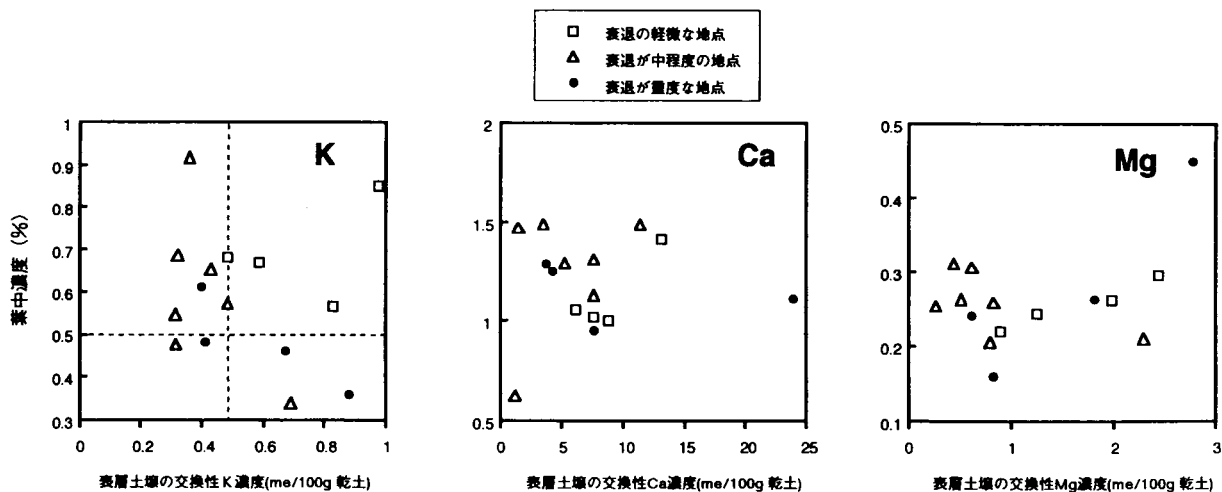


図-3 スギの衰退度の異なる社寺林のスギ大径木の葉中養分濃度と土壌の交換性塩基濃度

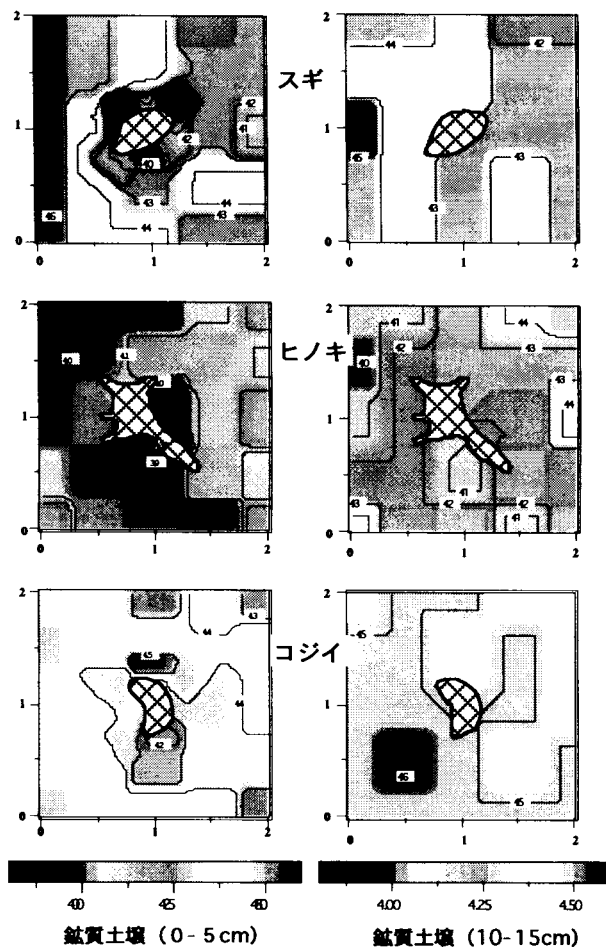


図-1 樹幹流圏土壌のpH分布図

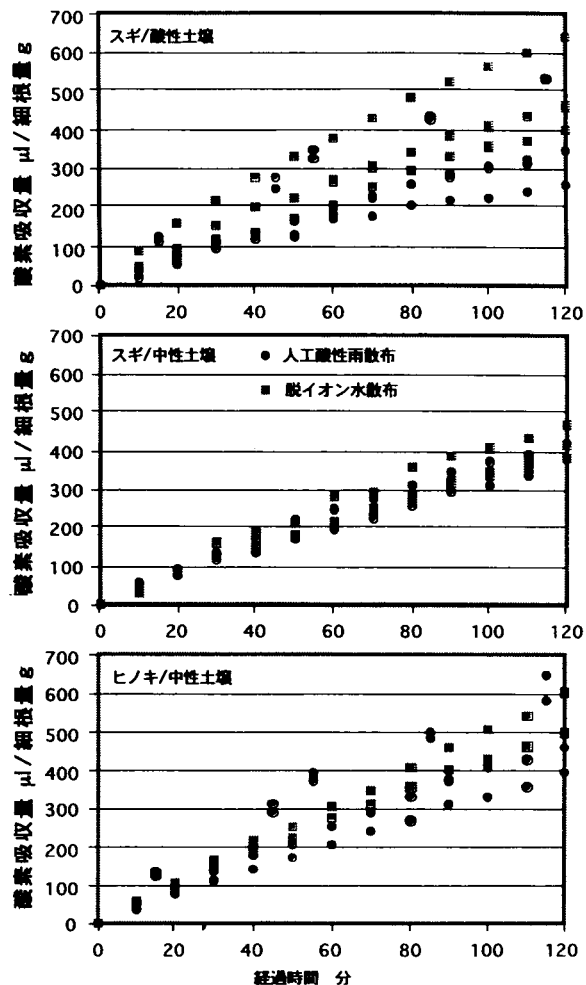


図-4 細根 (直径 1 mm 未満) の酸素吸収量の時間経過

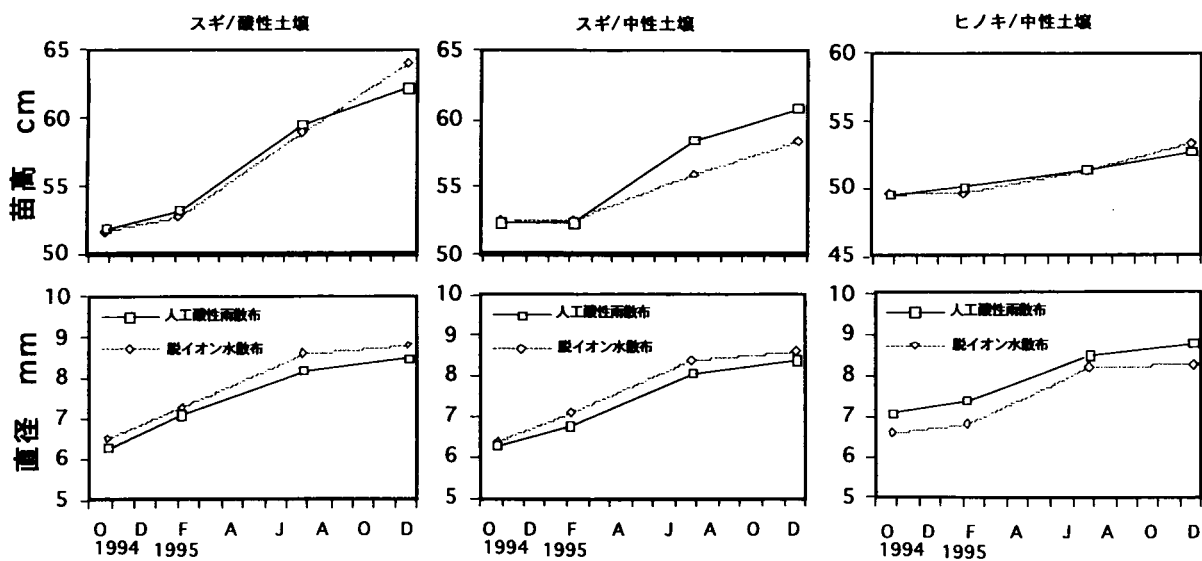


図-2 苗高と直径 (5cm高さ) の季節変化

表-1 表層土壌の平均 pH、Y1 および酸性雨の年平均 pH

林分	深さ	年平均 pH(92.8-94.7)					
		cnpH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	Y1	林外面	林内面	樹幹流
スギ	0-5	5.0	4.3	18.7	4.5	5.2	3.9
	20-25	4.8	4.2	15.7			
ヒノキ	0-5	4.4	3.8	39.7		4.7	4.0
	20-25	4.5	4.1	37.8			
マツ	0-5	4.7	4.1	42.0			
	20-25	4.8	4.2	43.0			
コジイ	0-5	4.8	4.2	36.0		4.7	4.6

表-2 深さ別の積根量(g/m<sup>2</sup>、直径2mm以下)

深さ cm	スギ林	ヒノキ林	マツ林	コジイ林
Ao			17.8 11%	36.7 12%
0~5	36.7 22%	54.5 41%	38.9 23%	100.0 33%
5~10	26.7 16%	14.4 11%	36.7 22%	71.1 24%
10~20	27.5 17%	32.5 24%	42.5 26%	62.5 21%
20~30	72.5 44%	32.5 24%	30.0 18%	30.0 10%
計	163.4 100%	133.9 100%	165.9 100%	300.3 100%

表-3 ポット土壌の化学性

樹種	供試土壌	処理	深さ	meq/乾土100g										ポット番号
				pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	ic(μS/cm)	Y1	Al	CEC	Ca	Mg	Na	K	
スギ	酸性土壌	人工酸性雨	0-10cm	3.6	3.4	391	44.3	1.39	14.47	0.28	0.15	0.08	0.09	103-1
スギ	酸性土壌	人工酸性雨	10-20cm	4.2	3.7	307	32.3	1.24	10.06	0.55	0.75	0.62	0.07	103-2
スギ	酸性土壌	人工酸性雨	20cm-	4.7	3.7	162	24.6	0.97	14.26	0.34	0.50	1.02	0.07	103-3
スギ	酸性土壌	脱イオン水	0-10cm	5.3	3.7	41	19.0	0.75	13.92	0.66	0.52	0.37	0.15	107-1
スギ	酸性土壌	脱イオン水	10-20cm	5.0	3.7	60	23.5	0.92	13.99	0.22	0.33	0.44	0.08	107-2
スギ	酸性土壌	脱イオン水	20cm-	4.9	3.7	84	23.7	0.91	16.02	0.18	0.34	0.53	0.10	107-3
スギ	中性土壌	人工酸性雨	0-10cm	3.9	3.4	474	34.1	1.29	15.41	2.06	1.14	0.25	0.35	67-1
スギ	中性土壌	人工酸性雨	10-20cm	5.9	4.4	303	0.2	0.00	14.64	5.44	2.75	0.84	0.37	67-2
スギ	中性土壌	人工酸性雨	20cm-	6.1	4.5	391	0.2	0.00	13.73	5.45	2.72	1.57	0.35	67-3
スギ	中性土壌	脱イオン水	0-10cm	7.2	4.5	34	0.4	0.01	16.58	4.28	2.14	1.14	0.40	89-1
スギ	中性土壌	脱イオン水	10-20cm	6.7	4.4	43	0.4	0.01	15.94	4.16	1.90	0.74	0.36	89-2
スギ	中性土壌	脱イオン水	20cm-	6.6	4.6	69	0.4	0.01	17.90	4.07	2.00	0.85	0.34	89-3
ヒノキ	中性土壌	人工酸性雨	0-10cm	4.2	3.4	510	25.9	0.90	20.82	2.98	1.70	0.86	0.42	48-1
ヒノキ	中性土壌	人工酸性雨	10-20cm	5.4	4.1	305	2.0	0.07	17.44	4.91	2.44	1.11	0.47	48-2
ヒノキ	中性土壌	人工酸性雨	20cm-	6.2	4.8	223	0.4	0.01	18.06	5.04	2.54	1.15	0.48	48-3
ヒノキ	中性土壌	脱イオン水	0-10cm	7.2	4.7	32	0.4	0.01	21.95	4.39	2.18	1.21	0.51	46-1
ヒノキ	中性土壌	脱イオン水	10-20cm	6.5	4.5	54	0.4	0.01	20.12	3.98	2.03	1.04	0.47	46-2
ヒノキ	中性土壌	脱イオン水	20cm-	6.6	4.7	49	0.4	0.01	20.12	4.01	2.01	0.93	0.49	46-3
無雑生	中性土壌	人工酸性雨	0-10cm	4.0	3.4	717	36.8	1.25	19.36	2.90	1.40	0.57	0.46	126-1
無雑生	中性土壌	人工酸性雨	10-20cm	6.1	4.6	273	0.4	0.01	18.52	5.31	2.49	0.86	0.51	126-2
無雑生	中性土壌	人工酸性雨	20cm-	6.2	4.6	173	0.4	0.01	17.80	4.70	2.34	0.85	0.50	126-3
無雑生	中性土壌	脱イオン水	0-10cm	7.0	4.6	55	0.4	0.01	19.68	4.28	2.05	1.05	0.45	133-1
無雑生	中性土壌	脱イオン水	10-20cm	6.9	4.7	40	0.4	0.01	19.96	4.28	2.08	0.67	0.44	133-2
無雑生	中性土壌	脱イオン水	20cm-	6.7	4.5	41	0.4	0.01	18.73	4.29	2.10	0.74	0.46	133-3
供試土壌	中性土壌			6.7	4.7	39	0.3	0.01	19.94	4.74	2.09	0.67	0.45	
供試土壌	酸性土壌			4.8	3.8	48	21.9	0.81	19.19	0.48	0.38	0.11	0.19	

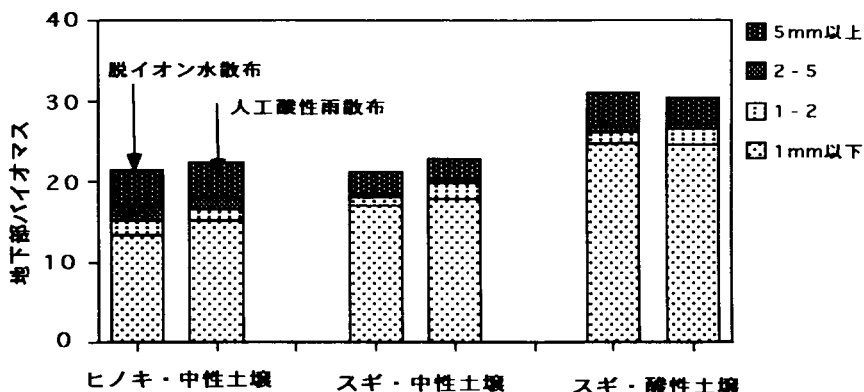


図-6 地下部のバイオマス

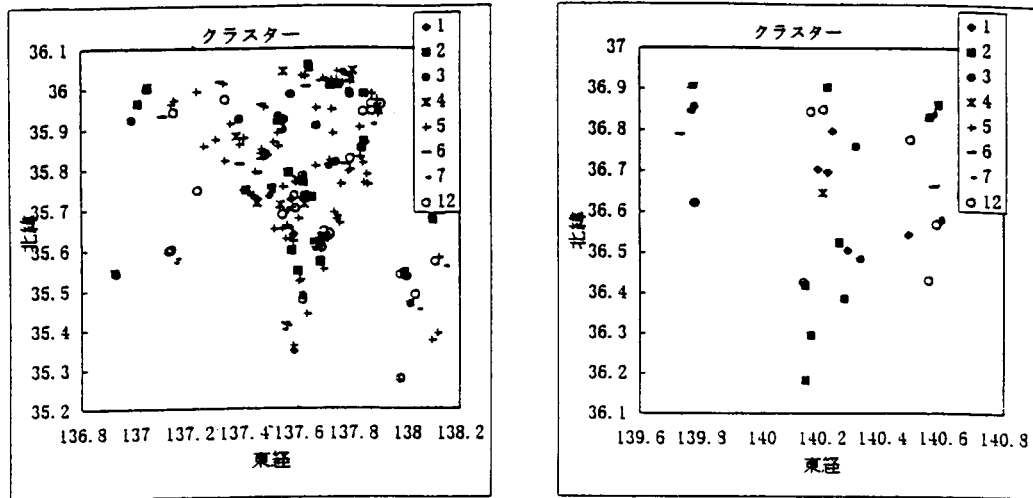


図8 中部（左）及び関東（右）地域の土壌特性（クラスターの分布）

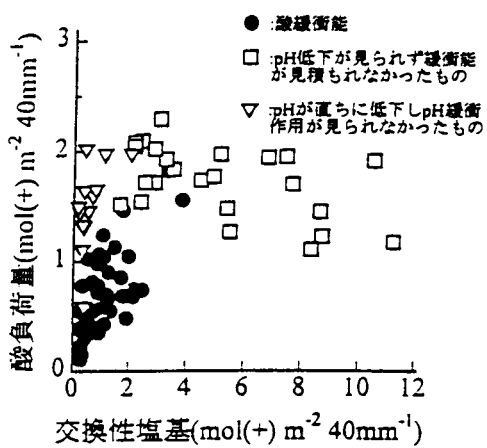


図9 酸緩衝能と交換性塩基の関係

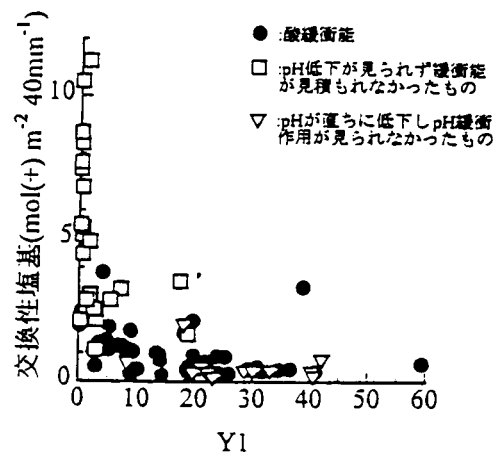


図10 交換性塩基とY1の関係

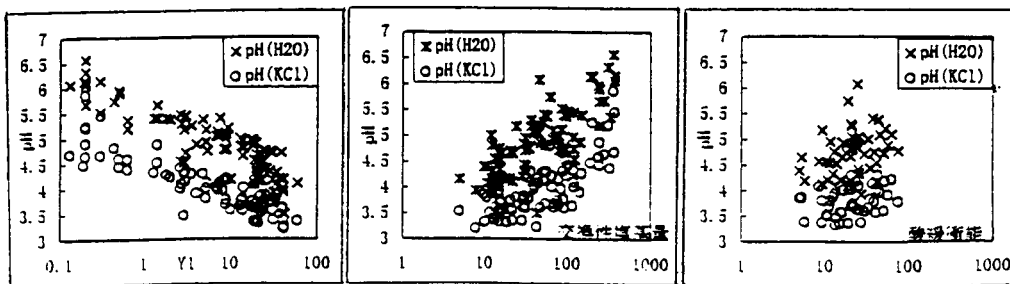


図11 供試土壌のpH、Y1、交換性塩基量と酸緩衝能  
pH Y1以外の単位はmol(+) m<sup>2</sup>/40mm

表-4 森林土壌の理化学性 (土壌型別) それぞれ平均値

土壌型	地点		表層 (0-10cm)							次層 (20cm-)						
	数	標高	容積重	pH(H2O)	pH(KCl)	Y1	T-C	T-N	C/N	容積重	pH(H2O)	pH(KCl)	Y1	T-	T-	C/N
BA	134	487	49	4.74	4.01	26.1	7.9	0.32	25	69	4.99	4.19	21.8	3.0	0.15	20
BB	257	640	43	4.70	3.96	28.4	10.5	1.85	20	56	5.11	4.30	20.3	3.8	0.22	17
BC	191	601	53	4.99	4.20	19.1	8.6	0.51	17	77	5.17	4.29	20.8	3.5	0.24	16
BD	318	633	42	5.13	4.45	13.6	10.1	0.68	15	66	5.31	4.48	11.0	4.4	0.35	13
BD(d)	209	627	50	4.98	4.21	16.7	9.5	0.58	17	63	5.21	4.35	13.5	3.5	0.25	15
BE	229	634	43	5.38	4.63	7.7	10.0	0.72	14	61	5.44	4.55	7.5	5.1	0.40	13
BF	25	336	30	5.48	4.77	3.7	9.9	0.68	14	105	5.47	4.39	8.4	2.7	0.24	13
BI	4	530		5.23	3.97	10.2	8.8	0.63	15		5.58	4.23	8.9	4.0	0.26	15
BIABC	33	594	43	5.26	4.33	15.3	11.2	0.72	17	61	5.46	4.53	9.1	5.4	0.38	16
BLD	109	569	47	5.23	4.46	11.2	12.3	0.78	16	62	5.43	4.60	8.8	6.7	0.48	15
BLD(d)	47	732	42	5.05	4.20	15.8	12.3	0.81	16	55	5.31	4.49	10.9	7.0	0.46	15
BLE	48	663	39	5.10	4.30	12.8	13.9	0.92	15	52	5.30	4.51	9.7	8.4	0.52	15
DR	1	490		5.60	4.80	2.6	5.5	0.58	9		5.40	4.20	0.2	2.1	0.19	11
G	35	422		5.07	4.34	12.9	12.8	0.91	14		5.32	4.41	21.0	3.8	0.33	12
Im	42	309	74	5.06	4.36	12.3	6.0	0.38	18	102	5.40	4.41	10.8	2.3	0.18	16
P	21	720		4.75	3.81	18.5	17.6	1.25	16		5.20	4.19	13.7	11.8	0.64	19
PD1	32	933		4.09	3.17	36.5	15.0	0.72	23		4.63	3.75	37.2	5.5	0.27	23
PD2	36	999	47	4.18	3.41	44.9	17.1	0.88	22	38	4.78	4.02	24.9	7.1	0.38	19
PD3	129	847	32	4.35	3.63	35.0	14.5	0.69	21	42	4.98	4.18	21.0	5.4	0.28	20
PWh	70	1323	18	4.24	3.60	35.4	15.4	0.89	17	28	5.00	4.26	19.0	6.5	0.35	18
PWi	29	979		4.40	3.51	33.0	15.8	0.81	21		4.95	3.89	32.7	4.2	0.25	17
R	23	256	78	5.18	4.30	17.7	5.1	0.30	21	103	5.30	4.07	21.2	1.9	0.11	21
Y	3	160	100	5.20	4.27	14.2	4.7	0.27	18	124	4.73	3.67	62.4	0.5	0.06	8
dBD	46	718	48	4.90	4.20	15.6	11.3	0.75	15	60	5.26	4.39	9.5	5.6	0.39	14
gB	22	476		4.63	4.11	28.6	9.0	0.54	17		5.12	4.35	22.8	2.7	0.19	15
gRY	1	130	82	4.60	4.00	17.8	2.6	0.13	20	142	4.90	4.00	14.3	0.5	0.04	13
rB	17	301		5.02	4.11	18.0	9.6	0.63	20		5.37	4.30	20.7	1.8	0.27	14
yB	9	460	40	4.71	3.93	14.0	10.9	0.80	16	57	4.94	4.22	12.8	4.0	0.31	14

表-5 土壌型別の各クラスターの分布

クラスター	それぞれ地点数											
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12		
地点数	147	551	438	167	342	119	43	19	4	324		
表層土の特性 (平均値)												
pH(H2O)	5.0	5.3	5.3	4.6	4.3	4.2	4.2	4.7	5.2	5.0		
pH(KCl)	4.2	4.5	4.5	3.8	3.6	3.4	3.4	3.7	4.1	4.2		
Y1	15	7	7	32	34	66	79	72	155	14		
T-C	6	8	13	10	16	13	12	9	7	7		
容積重	88	51	35	53	34	46	39	55	60	60		
土壌型												
BA	9	33	17	18	14	10	5	5		27		
BB	16	51	41	19	51	32	11	5	1	32		
BC	27	45	24	31	15	6	1	5		42		
BD	15	101	80	15	43	9	2	1		60		
BD(d)	14	70	33	12	31	6	2	1		46		
BE	9	91	84	6	14	2				29		
BF	2	14	3	1						5		
BI		1								3		
BIABC	1	13	10		4	2	1			4		
BLD	5	34	47	2	14	1		1		6		
BLD(d)		10	21	1	10	1	1			4		
BLE	1	9	25	3	11					1		
DR										1		
G	6	4	10	5			2			9		
Im	11	9	3	2	3		1			13		
P		4	5	2	7					3		
PD1	2	2		8	7	5	3			5		
PD2		2	2	4	13	8	1	11=1	2	3		
PD3	7	17	13	9	47	19	9		9=1	7		
PWh		6	5	6	39	8	2			4		
PWi		4	1	8	8	4	2			2		
R	12	1	2	2		1				5		
Y	3											
dBD	1	18	10	3	6				1	7		
gB		6		6	3	4				3		
gRY	1											
rB	5	3	1	1	2	1				3		
yB		5	1	1	1					1		

注: クラスター番号9, 11は1点のため8と10の欄に=で表示した。

