

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

① 土壌-植物系における臨界負荷量の評価に関する実験的研究

研究代表者 農林水産省森林総合研究所立地環境部 堀田 庸

環境庁 国立環境研究所 酸性雨研究チーム 佐竹研一

(委託先) 東京農工大学農学部大気環境学研究室 戸塚 績・伊豆田 猛

平成5-7年度合計予算額 9,000千円
(平成7年度予算額 2,800千円)

[要旨]

(1) 黒ボク土(火山灰母材)、赤黄色土(非固結推積岩母材)または、褐色森林土(花崗岩母材)に硫酸溶液を添加し、人工的に土壌を酸性化させた。これらの土壌を詰めたポットにスギの2年生苗を移植し、12週間育成した。その結果、いずれの土壌でも、酸添加量の増加に伴って、土壌pHは低下したが、逆に水溶性Al濃度やMn濃度は増加した。また、土壌酸性化によるスギ苗の成長低下の程度は、土壌の種類によって異なり、同量の酸を土壌に添加した場合でも、黒ボク土に比べて、褐色森林土や赤黄色土においては、高濃度のAlが溶出し、それに伴う成長低下が著しかった。

(2) 母材が異なる4種類の褐色森林土(火山灰母材、砂岩・粘板岩母材および花崗岩母材とする2種類)に硫酸溶液を添加し、土壌を酸性化させた。これらの酸性化させた土壌または、酸添加しない対照土壌を詰めたポットに2年生のスギ苗を移植し、12週間育成した。その結果、酸性化させたいずれの褐色森林土でも、土壌中の水溶性Al濃度の増加が $20\mu\text{g/g}$ (ppm)より高くなると、明らかにスギ苗の乾物成長が低下した。

(3) 塩基溶脱を伴う酸性化処理と塩基溶脱を伴わない処理を行った褐色森林土(花崗岩母材)でスギ苗を100日間育成し、その乾物成長と栄養状態への影響を調べた。その結果、土壌の水溶性Al濃度が $100\mu\text{g/g}$ (ppm)以下の場合、スギ苗の乾物成長と土壌溶液の $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ モル比との間で高い相関がみられた。 $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ 比が10以下になると、スギ苗の乾物成長が低下し始め、その比が1.0では、対照区の値の50%に低下した。土壌におけるカチオンとAlのモル比は、スギ苗の元素濃度と正の相関があり、 Mg/Al 比と根のMg濃度との相関が高かった。

以上の結果より、土壌における $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ 比は、我が国における酸性降下物による森林生態系被害の将来予測や臨界負荷量の評価において重要な指標になると考えられた。

[キーワード] 酸性降下物、褐色森林土、土壌酸性化、塩基溶脱、スギ、成長影響、

我が国で生育している樹木に対する土壤酸性化の影響に関する実験的研究は、現在のところ、極めて限られている^{4, 10)}。また、根圏における低pHや過剰なAlまたはMnの存在が、我が国の樹種に及ぼす影響に関する研究も非常に少ない^{5, 6, 8, 9)}。我が国の樹木や土壤は、諸外国のそれらとは明らかに性質が異なるため、欧米などで報告されている酸性雨や土壤酸性化の樹木影響に関する研究結果は、もちろん参考にはなるが、そのまま我が国に当てはめることはできない。

そこで、本研究では、我が国の代表的な土壤の酸性化が、スギの成長、生理機能および栄養状態に及ぼす影響とその主要な土壤要因を実験的研究によって明らかにし、我が国の森林生態系における酸性降下物の臨界負荷量を評価する際に必要な基礎データを提供することを目的とした。なお、具体的には、平成5年度から7年度の3年間にわたって、以下に示した3項目の実験を行ったので、順次それらの結果を報告する。

1. 黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土で育成したスギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響
2. 母材が異なる褐色森林土で育成したスギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響
3. 塩基溶脱を伴う土壤酸性化がスギ苗の成長と栄養状態に及ぼす影響

1. 黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土で育成したスギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響

1.1 研究目的

本実験では、我が国に広く分布する3種類の土壤（黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土）で育成したスギ苗の乾物成長と栄養状態に対する土壤酸性化の影響を明らかにすることを目的とした。

1.2 研究方法

1.2.1 供試土壤と土壤酸性化処理

供試土壤として、東京都八王子市から採取した黒ボク土（火山灰母材）、愛知県豊橋市から採取した赤黄色土（非固結堆積岩母材）、愛知県瀬戸市から採取した褐色森林土（花崗岩母材）の3種類を用いた。黒ボク土および褐色森林土は、林床からリターを取り除き、0~20cm下から採取したが、赤黄色土は0~40cm下から採取した。各土壤11に、10（1区）、30（2区）、60（3区）または、100meq（4区）のH⁺を含む硫酸溶液（100ml）を添加し、十分に混合し、人工的に酸性化させた。なお、対照区（control）の土壤として、硫酸溶液を添加しない各土壤を用いた。

1.2.2 スギ苗の育成

上記の方法で酸性化させた土壤または、対照土壤を、500mlのプラスチックポットに詰め、そこにスギ（*Cryptomeria japonica* D. Don）の2年生苗を移植し、6月8日から8月31日までの12週間にわたって、温室内で育成した。育成開始日である6月9日（初回サンプリング）、育成開始6週間後の7月21日（中間サンプリング）および育成開始12週間後の9月1日（最終サンプリング）に、各処理区のスギ苗をサンプリングした。サンプリング後、スギ苗を、80℃に設定した熱風乾燥機内で7日間乾燥し、地上部および地下部の乾重量を測定した。初回および最終サンプリング時における個体乾重量の測定結果に基づき、相対成長率（RGR）を算出した。

1.2.3 土壌分析

スギ苗の育成開始時、育成開始6週間後および12週間後に、各処理区の土壌をサンプリングし、風乾した後、2mmメッシュのふるいにかけて、分析試料とした。分析試料(10g)を、100ml容のトールピーカーに取り、脱イオン水または、1N KCl(25ml)を加え、よく攪拌した。1時間静置後、pHメーター(TOA, HM-5B)で土壌懸濁液のpH(H₂O)およびpH(KCl)を測定した。

100ml容のトールピーカーに、分析試料(10g)を取り、脱イオン水(50ml)を加え、25℃に設定した恒温室内で1時間振漬した。その後、直ちに濾紙(アドバンテック, 5B)で濾過し、濾液中の元素濃度(Ca, Mg, Al, Mn)を原子吸光光度計で測定した。なお、測定値は風乾土当たりのμg/g(ppm)に換算した。

本実験においては、スギ苗の育成開始時、育成開始6週間後および12週間後における土壌pH(H₂O)の差は概ね0.2未満であり、元素濃度の大きな変動も認められなかったため、以下の解析には育成開始時における土壌分析の結果を用いた。

1.2.4 植物体内元素濃度の測定

育成開始12週間後(最終サンプリング)に、スギ苗の地上部と地下部の乾燥試料を粉碎し、硝酸-過塩素酸法で湿式灰化した。放冷後、1N 塩酸で希釈し、試料液とした。この試料液中の元素濃度(Ca, Mg, Al, Mn)を原子吸光光度計(島津製作所, AA-670型)で測定した。なお、測定値は、植物体の乾重量当たりの含有率に換算した。

1.3 実験結果

スギ苗の育成開始時における土壌分析の結果、いずれの土壌においても、酸添加量の増加に伴って、土壌pHは低下したが、逆に水溶性のAlおよびMn濃度は増加した。各土壌に同量の酸を添加した場合、褐色森林土と赤黄色土の水溶性Al濃度は、黒ボク土に比べて高かった。また、いずれの土壌においても、酸添加量の増加に伴って、水溶性のCaおよびMg濃度が増加した。

育成開始6週間後および12週間後におけるスギ苗の乾重量は、土壌への酸添加量の増加に伴って、褐色森林土および赤黄色土で6週間育成したスギ苗の個体乾重量が低下し、両土壌の4区ではすべての個体が枯死した。これに対して、黒ボク土においては、いずれの処理区においても枯死した個体は認められず、各処理区の個体乾重量には有意な差がなかった。一方、育成開始12週間後においても、土壌への酸添加量の増加に伴って、褐色森林土および赤黄色土で育成したスギ苗の個体乾重量は低下し、褐色森林土の3区においても、すべての個体が枯死した。黒ボク土においては、いずれの処理区においても枯死した個体は観察されなかったが、4区における個体乾重量は対照区に比べて有意に減少した。なお、いずれの土壌においても、土壌酸性化による地下部乾重量の低下程度が、地上部乾重量のそれに比べて大きかった。

12週間の育成期間中におけるスギ苗の個体乾物成長の相対成長率(RGR)は、いずれの土壌でも、土壌への酸添加量の増加に伴って低下した。しかし、同量の酸を土壌に添加した場合、褐色森林土または赤黄色土におけるRGR低下の程度は、黒ボク土におけるそれに比べて大きかった。

各処理区における育成開始12週間後におけるスギ苗の生存個体の元素濃度について調べた結果、黒ボク土の第4区で育成したスギ苗の地下部におけるCaおよびMg濃度は、対照区のそれらに比べて低下した(表1)。これに対して、土壌酸性化処理区における地上部Mg濃度、地上部と地下部

のMnおよびAl濃度は、対照区のそれらに比べて増加した。赤黄色土の土壤酸性化処理区で育成したスギ苗においては、対照区の値に比べて、地上部Ca濃度と地下部Mg濃度は低下したが、逆に地上部Mn濃度と地上部および地下部のAl濃度は増加した。一方、褐色森林土の土壤酸性化処理区で育成したスギ苗では、対照区の値に比べて、地上部と地下部のCaおよびMg濃度は低下したが、第3区における地上部と地下部のAl濃度は増加した。なお、褐色森林土の第1区および第2区における地上部と地下部のMn濃度は、対照区のそれらと有意な差はなかった。

1.4 考察

土壤酸性化によるスギ苗の成長低下に関与する主要な土壤要因を明らかにするために、土壤のpH、水溶性Al濃度または、水溶性Mn濃度と12週間の育成期間中におけるスギ苗のRGRの対照値に対する相対値（以降、RGRの相対値とする）との関係を検討した（図1）。その結果、土壤pHが約4.2以下に低下すると、スギ苗のRGRの相対値が低下し始めた。また、スギ苗のRGRの相対値と土壤の水溶性Al濃度との間には、高い負の相関が認められた。これに対して、スギ苗のRGRの相対値と土壤の水溶性Mn濃度との間には、高い相関は認められなかった。図2に示したように、スギ苗のRGRの相対値と地上部または、地下部のAl濃度との間には、高い負の相関が認められた。これに対して、図3に示したように、スギ苗のRGRの相対値と地上部または、地下部のMn濃度との間には、相関が認められなかった。以上の結果は、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下に対して、土壤pHの低下のみならず、土壤に溶出したAlが強く関与していることを示唆している。

本実験においては、同量の酸を土壤に添加しても、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下の程度が土壤の種類によって異なり、黒ボク土に比べて、褐色森林土や赤黄色土において大きかった。本実験と同じ地点から採取した褐色森林土と赤黄色土は、黒ボク土に比べて、土壤中の交換性塩基濃度が低く、酸に対する緩衝能も低いことが報告されている^{11, 12)}。

また、黒ボク土は、アロフェンを多く含むため、 SO_4^{2-} を吸着しやすい。この吸着の際に、土壤中へ OH^- が放出され、 H^+ を中和するため、他の土壤に比べて、硫酸添加による土壤pHの低下が生じにくいと考えられる^{12, 16)}。したがって、黒ボク土に比べて、褐色森林土と赤黄色土においては、少量の酸によって土壤pHが低下し、土壤中に多量のAlが溶出したため、スギ苗の成長低下の程度が大きかったと考えられる。

高濃度のAlを含む水耕液で育成した植物においては、植物体内のCa濃度やMg濃度などが低下することが報告されている^{3, 14)}。本実験においても、酸性化させた各土壤で育成したスギ苗のCa濃度とMg濃度は、それぞれの対照値に比べて低下し、特に褐色森林土では、 $10\text{meq } H^+/L$ 区においても有意に低下した。この結果は、酸性土壤で育成したスギ苗においては、Al障害によって、根からのCaやMgの吸収が抑えられたことを示唆している。このようなAlによるカチオンの吸収障害の原因として、根の原形質膜に存在するイオンチャンネルをAlがブロックすることなどが指摘されている¹⁵⁾。したがって、酸性土壤で育成したスギ苗の成長低下の一因として、Alによる栄養塩の吸収阻害も考えられるため、今後は植物体の栄養状態に及ぼす土壤酸性化の影響を詳細に調べる必要がある。

本実験の結果より、黒ボク土に比べて、褐色森林土と赤黄色土においては、少量の酸添加によって、スギ苗の成長が低下することが明らかになった。特に、褐色森林土は、我が国の国土面積の約4割を占め¹³⁾、代表的な森林土壤であるため、この土壤の酸性化が樹木に及ぼす影響を詳細

に調べる必要がある。そこで、次に、母材が異なる数種類の褐色森林土を採取し、それらの酸性化がスギ苗の成長、ガス交換速度および栄養状態などに及ぼす影響を調べた。

2. 母材が異なる褐色森林土で育成したスギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響

2.1 研究目的

人為的に酸性化した褐色森林土や赤黄色土で育成させたスギ苗の成長低下の程度は、黒ボク土におけるそれに比べて大きいことが明らかになった。そこで、本実験では、火山灰、花崗岩または、砂岩・粘板岩を母材とする褐色森林土で育成したスギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響を調べることを目的とした。

2.2 研究方法

供試土壌として、火山灰母材（群馬県勢多郡にて採取、東京農工大学草木演習林）、花崗岩母材（愛知県瀬戸市または、東京農工大学草木演習林にて採取）および砂岩・粘板岩母材（群馬県勢多郡にて採取）の4種類の褐色森林土を用いた。各土壌1Lに対して、10, 30, 60 または、100 meqの H^+ を含む硫酸溶液(100ml)を添加し、酸性化させた。対照区の土壌としては、硫酸溶液を添加しない各土壌を用いた。これらの酸性化させた土壌または、対照土壌を詰めた500mlのビニールポットに、2年生のスギ苗を移植し、6月13日から9月5日までの12週間にわたり、温室内で育成した。12週間育成後、各処理区の個体の乾重量を測定し、それらの結果に基づいて生長解析を行った。また、スギ苗の育成開始時において、土壌分析を行った。なお、本実験の方法は、基本的には、1.2に記述した方法と同様である。

2.3 実験結果

図4に、土壌への酸添加量と土壌のpH、水溶性Al濃度または、水溶性Mn濃度との関係を示した。いずれの褐色森林土においても、土壌への酸添加量の増加に伴って、土壌pHは低下したが、水溶性Al濃度は上昇した。しかし、同量の酸を添加しても、各土壌の水溶性Al濃度は異なり、花崗岩(瀬戸) > 火山灰 > 花崗岩(草木) > 砂岩・粘板岩の順に高かった。一方、土壌への酸添加量の増加に伴って水溶性Mn濃度は増加した。

図5に示したように、いずれの褐色森林土においても、酸添加量の増加に伴って、スギ苗の個体乾重量が低下し、花崗岩母材の褐色森林土(瀬戸)の100meq $H^+ \cdot L^{-1}$ 区では、供試したすべての個体が枯死した。

12週間の育成期間中におけるスギ苗のRGRとNARは、いずれの褐色森林土においても、土壌への酸添加量の増加に伴ってほぼ同程度に低下した。図6に、スギ苗の相対生長率(RGR)と土壌pHとの関係を示した。土壌のpH(H_2O)が約4.2以下の条件では、pHの低下に伴って、スギ苗のRGRはほぼ直線的に低下した。スギ苗のRGRと土壌の水溶性Mn濃度との関係については、各土壌で水溶性Mn濃度の増加に伴って、スギ苗のRGRが低下する傾向が認められたが、全体としては、両者の間に高い相関は認められなかった。

図7に、スギ苗のRGRと土壌の水溶性Al濃度との関係を示した。土壌の水溶性Al濃度の増加に伴

って、スギ苗のRGRが低下する傾向が認められた。図8に、図7の点線で囲んだ部分を拡大した結果を示した。土壤の水溶性Al濃度が20ppm以上に達すると、いずれの褐色森林土においても、スギ苗のRGRは明らかに低下した。

2.4 考察

本実験においては、いずれの土壤においても、酸添加量の増加に伴って、スギ苗の個体乾重量が低下した(図5)。この時、土壤への酸添加量の増加に伴い、土壤のAl濃度が上昇し(図4)、各土壤で育成したスギ苗のRGRとNARはほぼ同程度低下した。したがって、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下の原因として、地上部における乾物生産効率(純光合成速度)の低下が考えられる。

スギ苗のRGRと土壤pHとの関係を検討した結果(図6)、土壤のpH(H₂O)が約4.2以下の条件では、pHの低下に伴って、RGRはほぼ直線的に低下した。しかし、土壤の水溶性Mn濃度とRGRの間には高い相関は認められなかった。これに対して、土壤の水溶性Al濃度の増加に伴って、スギ苗のRGRが低下する傾向が認められ(図7)、土壤中の水溶性Al濃度が20ppmに達すると、スギ苗のRGRが明らかに低下した(図8)。したがって、母材が異なる褐色森林土においても、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下には、土壤中に溶出したAlが強く関与したと考えられる。

本実験においては、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下の程度が土壤によって異なり、例えば火山灰や花崗岩を母材とした褐色森林土の30meq H⁺/L区で育成したスギ苗の個体乾重量は対照値に比べて有意に減少したが、砂岩・粘板岩母材の褐色森林土の同区で育成したスギ苗の個体乾重量は対照値と有意な差はなかった(図5)。この原因としては、同量の酸を各土壤に添加しても、土壤溶液中のAl濃度が異なり、花崗岩(瀬戸)>火山灰>花崗岩(草木)>砂岩・粘板岩の順に高かったことが考えられる。

以上の結果より、同量の酸を褐色森林土に添加しても、その母材が異なると、土壤酸性化によるスギ苗の成長低下の程度が土壤によって異なることが明らかになった。しかし、いずれの母材の褐色森林土においても、水溶性Al濃度が約20ppm以上に達すると、明らかにスギ苗の成長が低下することが示された。

3. 塩基溶脱を伴う土壤酸性化がスギ苗の成長と栄養状態に及ぼす影響

3.1 研究目的

酸性雨による土壤酸性化の比較的初期の段階では、植物必須元素が土壤から溶脱するが、その後は土壤溶液中にAlやMnなどの植物有害金属が溶出すると考えられている。したがって、酸性雨による酸性化が進行しつつある土壤で生育している樹木は、養分欠乏の影響とAlなどの有害金属の影響を同時に受ける可能性がある。しかしながら、我が国で生育している樹木に対する塩基溶脱を伴う土壤酸性化の影響は明らかになっていない。

そこで、本実験では、塩基溶脱を伴う酸性化処理と塩基溶脱を伴わない酸性化処理を褐色森林土に行い、それらの土壤で育成したスギ苗の乾物成長と栄養状態を調べることを目的とした。

3.2 研究方法

供試土壌として、愛知県瀬戸市から採取した花崗岩母材の褐色森林土を用いた。塩基溶脱を伴う土壌酸性化処理区（L区）を設定するために、底に穴を開けた500mlのポットに土壌を詰め、その表面からpH2.0に調整した硫酸溶液を、1ポット当たり、1.0（L-I区：20meq H⁺/L 風乾土）、1.5（L-II区：30meq H⁺/L）、3.0（L-III区：60meq H⁺/L）または、5.0（L-IV区：100meq H⁺/L）ずつ添加した。一方、塩基溶脱を伴わない土壌酸性化処理区（NL区）を設定するために、乾土9.51Kgに相当する風乾土に、0.19 N（NL-I区：20 meq H⁺/L 風乾土）または、0.27 N（NL-II区：30 meq H⁺/L）の硫酸溶液を1L添加し、十分に混合した。なお、硫酸溶液を添加しない土壌を対照土壌とした。

各土壌を詰めた500mlのポットに、スギの2年生苗を移植し、6月12日から9月20日までの100日間にわたって、温室内で育成した。育成期間終了後に、スギ苗の乾重量と体内元素濃度の測定を行った。育成期間開始時に土壌分析を行った。なお、本実験における測定方法は、基本的には、1.2に記述した方法と同様である。

3.3 実験結果

図9に、スギ苗の育成開始時における土壌分析の結果を示した。土壌酸性化の方法にかかわらず、土壌への酸添加量の増加に伴って、土壌pHは低下したが、水溶性のAlおよびMn濃度は増加した。塩基溶脱を伴わない土壌酸性化処理区（NL区）では、酸添加量の増加に伴って、水溶性のK、CaおよびMg濃度が増加した。これに対して、塩基溶脱を伴う土壌酸性化処理区（L区）では、酸添加量の増加に伴って、水溶性のK、CaおよびMg濃度が低下した。

図10に土壌酸性化処理区で、100日間育成したスギ苗の個体乾重量の相対値〔（土壌酸性化処理区の個体乾重量／対照区の個体乾重量）×100〕と土壌pH（H₂O）との関係を示した。全体的には、両者の間に正の相関が認められたが、土壌pHが3.7付近においては、L区における個体乾重量の相対値は、NL区のそれに比べて低かった。図11に、スギ苗の個体乾重量の相対値と土壌の水溶性Al濃度との関係を示した。土壌の水溶性Al濃度の増加に伴い、個体乾重量の相対値は低下する傾向を示したが、Al濃度が約30 μg・g⁻¹（ppm）以下の場合、L区における個体乾重量の相対値は、NL区に比べて低い傾向が認められた。図12に水溶性元素濃度から算出した、土壌におけるCaとAlのモル比とスギ苗の個体乾重量の相対値との関係を示した。土壌におけるCa／Al比、Mg／Al比およびK／Al比の低下に伴って、スギ苗の個体乾重量の相対値は低下した。しかし、例えば、Ca／Al比が約3の場合やK／Al比が約2の場合、スギ苗の個体乾重量の相対値が多少ばらつく傾向がみられた。これに対して、図13に示したように土壌酸性化処理の方法にかかわらず、土壌の（Ca＋Mg＋K）／Al比の低下に伴って、スギ苗の個体乾重量の相対値が低下した。

土壌のCa／Al比、Mg／Al比または、K／Al比の低下に伴って、スギ苗の根におけるCa、Mgまたは、K濃度がそれぞれ低下する傾向を示した。なお、図14に、一例として、土壌のMg／Al比とスギ苗の根におけるMg濃度との関係を示した。

3.4 考察

スギ苗の個体乾重量の相対値と土壌pHとの関係を調べた結果（図10）、両者の間には、正の相関が認められたが、土壌pHが3.7付近においては、塩基溶脱を伴う土壌酸性化処理区（L区）における個体乾重量の相対値は、塩基溶脱を伴わない土壌酸性化処理区（NL区）のそれに比べて低かった。この結果は、酸性化させた褐色森林土で育成したスギ苗の成長低下の程度を、土壌pHだけ

では説明できないことを示している。一方、土壤の水溶性Al濃度の増加に伴い、個体乾重量の相対値は低下する傾向を示したが、Al濃度が約 $30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (ppm) 以下の場合、L区における個体乾重量の相対値は、NL区に比べて低い傾向が認められた(図11)。この結果は、土壤酸性化に伴うスギ苗の成長低下に土壤中に溶出したAlが関与しているが、このAlによる成長低下の程度は、その他の土壤要因に影響を受けることを示唆している^{2), 18)}。

欧米の樹種におけるAl障害の程度は、CaやMgのようなカチオンによって影響を受けることが報告されている¹⁾。さらに、土壤溶液や水耕液におけるCaとAlのモル比(Ca/Al比)は、樹木の成長や栄養状態と深く関連していることが報告されている²⁾。本実験では、土壤におけるCa/Al比、Mg/Al比およびK/Al比の低下に伴って、スギ苗の個体乾重量の相対値は低下した(図12)。しかし、例えば、Ca/Al比が約3の場合やK/Al比が約2の場合、スギ苗の個体乾重量の相対値が多少ばらつく傾向がみられた(図12)。これに対して、土壤酸性化処理の方法にかかわらず、土壤の(Ca+Mg+K)/Al比の低下に伴い、スギ苗の個体乾重量の相対値が低下した(図13)。これらの結果は、土壤酸性化に伴うスギ苗の成長低下の程度は、土壤におけるAl濃度のみならず、Alとカチオンの存在バランスによって決定されたことを示唆している。さらに、本実験においては、土壤のCa/Al比、Mg/Al比またはK/Al比の低下に伴って、スギ苗の根におけるCa, Mg, K濃度がそれぞれ低下する傾向を示したことから(図14)、酸性化させた褐色森林土で育成したスギ苗の栄養状態も土壤におけるAlとカチオンの存在バランスに影響を受けたと考えられる²⁾。

4. 本研究のまとめ

本研究の結果より、硫酸溶液の添加によって酸性化させた我が国の土壤で育成したスギ苗は土壤に溶出したAlの影響を受けるが、このAl障害の程度は、土壤のカチオン濃度に依存することが示された。したがって、酸性雨などの酸性降下物による土壤酸性化が樹木の成長や栄養状態に及ぼす影響を評価する場合、土壤におけるAlなどの植物有害金属の濃度のみならず、Ca, Mg, Kのような植物必須元素の濃度も考慮する必要がある。さらに、これらのカチオンとAlのモル比は、我が国の森林生態系被害発現に対する酸性降下物の臨界負荷量の評価において重要な指標になり得ると考えられる。

Sverdrup *et al.* (1994)¹⁸⁾ は、ヨーロッパに生育しているトウヒ類やマツ類の成長と土壤溶液における(Ca+Mg+K)/Alモル比との関係を検討し、(Ca+Mg+K)/Al=1.0を基準にして、PROFILEモデルにより、スウェーデンの森林における酸性降下物の臨界負荷量を評価している。そこで、彼等が報告したノルウェースプルーメス苗で得られた結果と本実験で得られたスギ苗の結果を比較した。なお、本研究では、土壤溶液の元素濃度は測定していないが、予備実験の結果、花崗岩母材の褐色森林土における水溶性元素濃度から算出した(Ca+Mg+K)/Alモル比と土壤溶液の元素濃度から算出した同モル比との間に直線関係($r=0.90$)が認められ、その回帰直線の勾配が約1であったため、両者は等しいと仮定した。図15に、ノルウェースプルーメス苗または、スギ苗の乾物成長と土壤における(Ca+Mg+K)/Al比との関係を示した。(Ca+Mg+K)/Alの低下に伴って、両樹種の乾物成長は低下したが、ノルウェースプルーメス苗に比べて、スギ苗の方が(Ca+Mg+K)/Alの低下に対して感受性が高かった。また、スギ苗の成長は、(Ca+Mg+K)/Al比が10以下になると明らかに低下し、(Ca+Mg+K)/Al=1.0の場合は、約50%に低下した。

Cronan & Grigal (1995)²⁾ は、森林生態系に対する酸性降下物の臨界負荷量の評価を行う際の有効な指標として、土壤溶液のCa/Alモル比を提案している。また、彼等は、土壤溶液のCa/Al比が1.0以上の場合でも、主に欧米で生育している多くの樹木の成長や栄養状態に悪影響が発現することを指摘している。これらの結果より、我が国の森林生態系における酸性降下物の臨界負荷量を、 $(Ca+Mg+K)/Al=1.0$ を基準にして算出した場合、過大評価する可能性がある。

本研究においては、スギを植物材料として、土壤酸性化の影響を各種土壌について調べたが、現在のところ、我が国に生育しているスギ以外の森林樹種に対する土壤酸性化やカチオンとAlのモル比の影響などはほとんど明らかになっていない^{7, 8)}。欧米で生育している樹木においては、Alに対する感受性に樹種間差異や品種間差異が認められているため¹⁷⁾、今後、我が国の森林生態系における酸性降下物の臨界負荷量の評価を正確に行うためには、少なくとも我が国の主要な針葉樹や広葉樹の成長、生理機能および栄養状態などに対する土壤酸性化やAlの影響を詳細に調べる必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 黒ボク土(火山灰母材)に比べて、褐色森林土(花崗岩母材)や赤黄色土においては、少量の酸添加によって、スギ苗の成長が低下した。

(2) 硫酸溶液によって酸性化させた4種類の褐色森林土で育成したスギ苗の乾物成長は、土壌のいずれの土壌においても、水溶性Al濃度の増加が強く関与し、その濃度が約20ppmより高くなると明らかに低下した。

(3) 土壌の水溶性Al濃度が $100 \mu\text{g/g}$ (ppm) 以下の場合には、スギ苗の乾物成長と土壌における $(Ca+Mg+K)/Al$ 比との相関が高く、 $(Ca+Mg+K)/Al$ 比が10以下になると、スギ苗の乾物成長が低下し始め、その比が1.0の場合、対照区の値の約50%に低下した。

(4) 土壌におけるカチオンとAlのモル比とスギ苗の元素濃度との間に正の相関があり、 Mg/Al 比と根のMg濃度との相関が高かった。

6. 参考文献

- (1) Abrahamsen, G. (1984). Effects of acidic deposition on forest soil and vegetation. Trans. Roy. Soc. London B 305, 369-382
- (2) Cronan, C.S. & Grigal, D.F. (1995). Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems. J. Environ. Qual., 24, 209-226
- (3) Foy, C.D., Chaney, R.L. & White, M.C. (1978). The physiology of metal toxicity in plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 14, 69-79.
- (4) 伊豆田 猛、横田 太、三宅 博、戸塚 績 (1990). スギ苗の生長に対する土壤酸性化の影響. 人間と環境, 16(2), 55-61.
- (5) Izuta, T., Noguchi, K., Aoki, M. and Totsuka, T. (1995). Effects of excess manganese on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. Environmental Sciences, 3, 209-220.

- (6) Izuta, T., Yamada, A., Miwa, M., Aoki, M. and Totsuka, T. (1996-a). Effects of low pH and excess Al on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. *Environmental Sciences*, 4, (in press)
- (7) Izuta, T., Seki, T. and Totsuka, T. (1996-b). Growth and nutrient status of *Betula platyphylla* seedlings grown in andosol and brown forest soil; acidified by adding H_2SO_4 solution. *Environmental Sciences*, 4, (in press)
- (8) 河野吉久、松村秀幸、小林卓哉 (1995). スギおよびヒノキの生育と養分吸収に及ぼすアルミニウムの影響. *大気環境学会誌*, 30, 316-326.
- (9) 三宅 博、亀井信一、伊豆田 猛、戸塚 績 (1991). 水耕栽培におけるスギ苗の生長に対するアルミニウムの影響. *人間と環境*, 16(1), 10-16.
- (10) 三輪 誠、伊豆田 猛、戸塚 績 (1994). 母材が異なる3種類の土壌の]酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響. *大気汚染学会誌*, 29(5), 254-263.
- (11) 大羽 裕 (1990). 酸性降下物が土壌の化学性に及ぼす影響と本邦土壌の酸中和能の評価. 文部省重点領域研究「人間環境系」研究報告集 G028-N11-01, pp.113-131.
- (12) 岡崎正規 (1990). 土壌に対する酸性降下物の影響. 文部省重点領域研究「人間環境系」研究報告集 G028-N11-01, pp.81-96.
- (13) ペドロジスト懇談会土壌分類命名委員会 (1990). 日本土壌図 (1/100万) .
- (14) Rengel, Z. (1992). Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytol.* 121, 499-513.
- (15) Rengel, Z. & Elliott, D.C. (1992). Mechanism of aluminum inhibition of net $^{45}Ca^{2+}$ uptake by *Amaranthus* protoplasts. *Plant Physiol.* 98, 632-638.
- (16) 佐藤一男、大岸 弘 (1990). 酸性降下物に対する土壌中和能の簡易測定法. *環境科学会誌*, 3, 37-48.
- (17) Schaedle, M., Thornton, F.C., Raynal, D.J. & Tepper, H.B. (1989). Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiology*, 5, 337-356.
- (18) Sverdrup, H., Warfvinge, P. & Nihlgard, B. (1994). Assessment of soil acidification effects of forest growth in Sweden. *Water, Air and Soil Pollution*, 78, 1-36.

7. 発表業績

[原著論文]

- (1) 三輪 誠、伊豆田 猛、戸塚 績 (1994). 母材が異なる3種類の土壌の酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響. *大気汚染学会誌*, 29(5), 254-263.
- (2) 太田垣 貴啓、三輪 誠、伊豆田 猛、戸塚 績 (1996). 硫酸添加により酸性化させた褐色森林土で育成したスギ苗の光合成活性. *大気環境学会誌*, 31(1), 11-19.
- (3) Izuta, T., Yamada, A., Miwa, M., Aoki, M. and Totsuka, T. (1996). Effects of low pH and excess Al on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. *Environmental Sciences*, 4 (in press)

[学会等における発表]

- (1)三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1993). 人工的に酸性化させた土壌におけるスギ苗の生長反応. 第40回日本生態学会(松江).
- (2) 三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1993). 母材が異なる土壌の酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響. 第34回大気汚染学会(千葉).
- (3)太田垣 貴啓, 三輪 誠, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 戸塚 績. (1993). スギ苗の光合成速度に対する土壌酸性化の影響. 第34回大気汚染学会(千葉).
- (4)Miwa, M., Izuta, T. and Totsuka, T. (1993). Effects of artificial soil acidification on the growth of Japanese cedar seedlings. XV International Botanical Congress, Tokyo, August 28-September 3, 1993, (Yokohama)
- (5)三輪 誠, 太田垣 貴啓, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 戸塚 績. (1994). 人工的に酸性かさせた土壌におけるスギ苗の生長反応(第2報). 第41回日本生態学会(福岡).
- (6)三輪 誠, 太田垣 貴啓, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 戸塚 績. (1994). 母材が異なる3種類の土壌の酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響(第2報). 第35回大気汚染学会(盛岡).
- (7)志摩 克, 三輪 誠, 山田亜紀子, 堀江勝年, 伊豆田 猛, 青木正敏, 戸塚 績. (1994). スギ苗の生長に対する水耕液のpHおよびAlの影響. 第35回大気汚染学会(盛岡).
- (8)Totsuka, T., Ohtani, T. & Izuta, T. (1995). Effects of soil acidification on growth and nutrient status of Japanese cedar seedlings. Acid Reign '95 ?, 5th International Conference on Acidic Deposition, 26-30 June 1995, Sweden.
- (9)三輪 誠, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 青木正敏, 戸塚 績. (1995). スギ苗の生長に対する土壌酸性化の影響. I. 母材が異なる褐色森林土への硫酸添加処理がスギ苗に及ぼす影響. 第36回大気環境学会(東京).
- (10)伊豆田 猛, 大谷知子, 三輪 誠, 堀江勝年, 青木正敏, 戸塚 績. (1995). スギ苗の生長に対する土壌酸性化の影響. II. 塩基溶脱を伴う土壌酸性化がスギ苗の成長と栄養状態に及ぼす影響. 第36回大気環境学会(東京).
- (11)三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績. (1995). 土壌酸性化に伴うアルミニウムの溶出と樹木影響. 第42回日本生態学会(盛岡), シンポジウム「酸性環境の生態学」.
- (12)伊豆田 猛. (1995). 酸性雨の植物影響. 大気環境学会 北海道・東北支部 講演会(福島).

表1 スギ苗の育成開始時における土壌分析の結果.

土壌	硫酸添加処理区 ($\text{neq}\mu\text{mol/L}$ 土壌)	pH(H_2O)	水溶性元素濃度 ($\mu\text{g/g}$ 風乾土)			
			Ca	Mg	Mn	Al
黒ボク土	対照区(0)	4.79 (0.01)	43.3 (0.3)	13.0 (0.1)	7.4 (0.1)	n. d.
	10	4.58 (0.01)	66.9 (0.1)	19.8 (0.1)	12.6 (0.1)	n. d.
	30	4.40 (0.00)	101.2 (0.6)	32.0 (0.0)	25.9 (0.1)	3.0 (0.5)
	60	4.20 (0.00)	163.1 (0.5)	62.6 (0.3)	65.0 (0.0)	15.0 (0.6)
	100	3.97 (0.02)	206.3 (1.4)	113.8 (1.0)	174.2 (1.0)	64.4 (0.2)
赤黄色土	対照区(0)	4.50 (0.00)	8.7 (0.1)	2.1 (0.1)	4.9 (0.1)	n. d.
	10	4.19 (0.01)	23.9 (0.3)	5.6 (0.1)	14.8 (0.2)	2.9 (0.2)
	30	3.72 (0.01)	48.1 (0.1)	11.2 (0.0)	55.0 (0.2)	46.1 (0.5)
	60	3.45 (0.00)	48.7 (0.7)	13.0 (0.3)	105.5 (2.0)	175.7 (1.5)
	100	3.26 (0.01)	44.0 (0.3)	14.3 (0.0)	126.6 (2.0)	346.9 (0.1)
褐色森林土	対照区(0)	4.30 (0.00)	22.7 (0.1)	6.5 (0.0)	4.1 (0.1)	3.6 (0.4)
	10	4.10 (0.00)	42.8 (0.2)	11.6 (0.1)	8.8 (0.0)	11.8 (0.5)
	30	3.75 (0.00)	83.8 (0.1)	15.5 (0.2)	24.5 (0.0)	91.7 (0.1)
	60	3.59 (0.01)	60.3 (2.4)	18.6 (0.2)	43.0 (0.3)	269.7 (1.1)
	100	3.45 (0.00)	50.2 (1.3)	20.7 (0.3)	53.5 (0.8)	473.4 (1.6)

カッコ内の値は標準偏差を示す。
n. d., not detected.

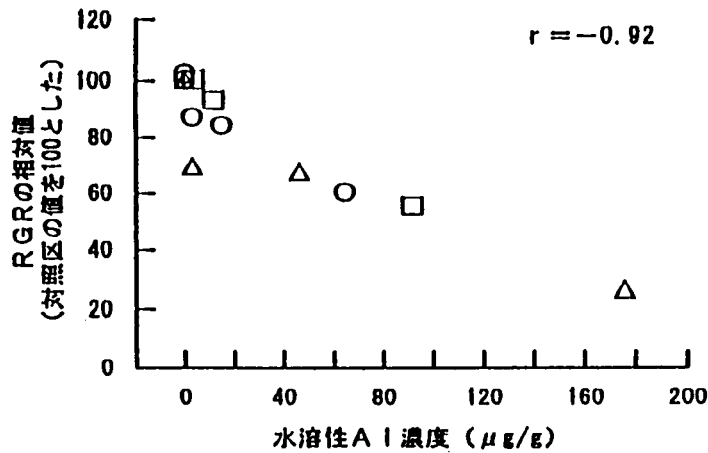
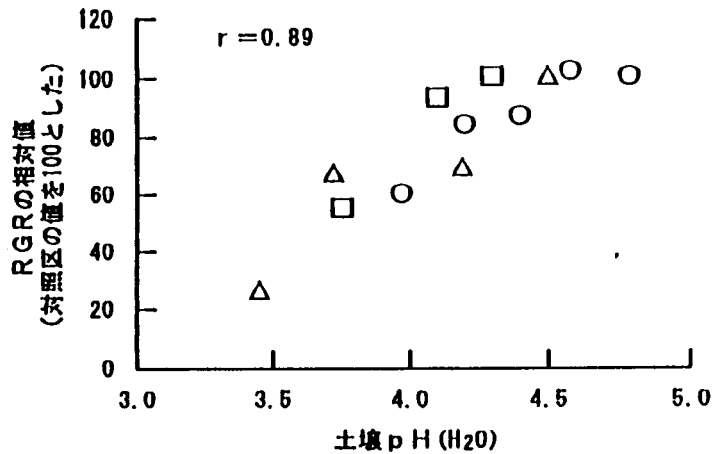


図1 育成開始時における土壌のpH(H_2O)、水溶性Al濃度、水溶性Mn濃度と12週間の育成期間中におけるスギ苗のRGRの相対値との関係。

○ 黒ボク土, △ 赤黄色土, □ 褐色森林土

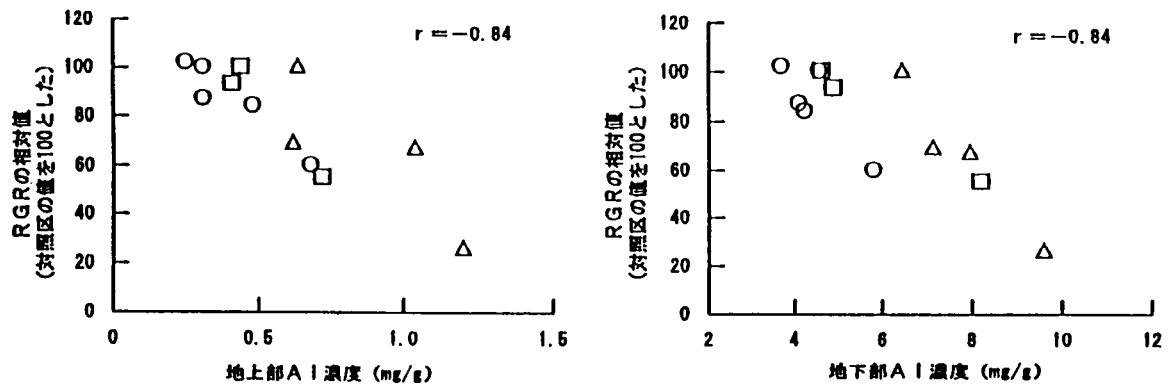


図2 育成開始12週間後におけるスギ苗の地上部または、地下部Al濃度と12週間の育成期間中におけるスギ苗のRGRの相対値との関係。図中に、相関係数を示した。
○ 黒ボク土, △ 赤黄色土, □ 褐色森林土

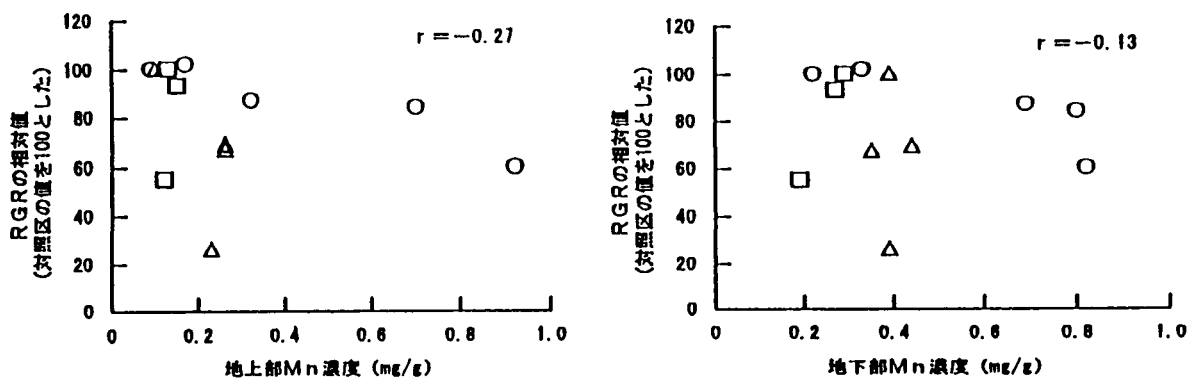


図3 育成開始12週間後におけるスギ苗の地上部または、地下部Mn濃度と12週間の育成期間中におけるスギ苗のRGRの相対値との関係。図中に相関係数を示した。
○ 黒ボク土, △ 赤黄色土, □ 褐色森林土

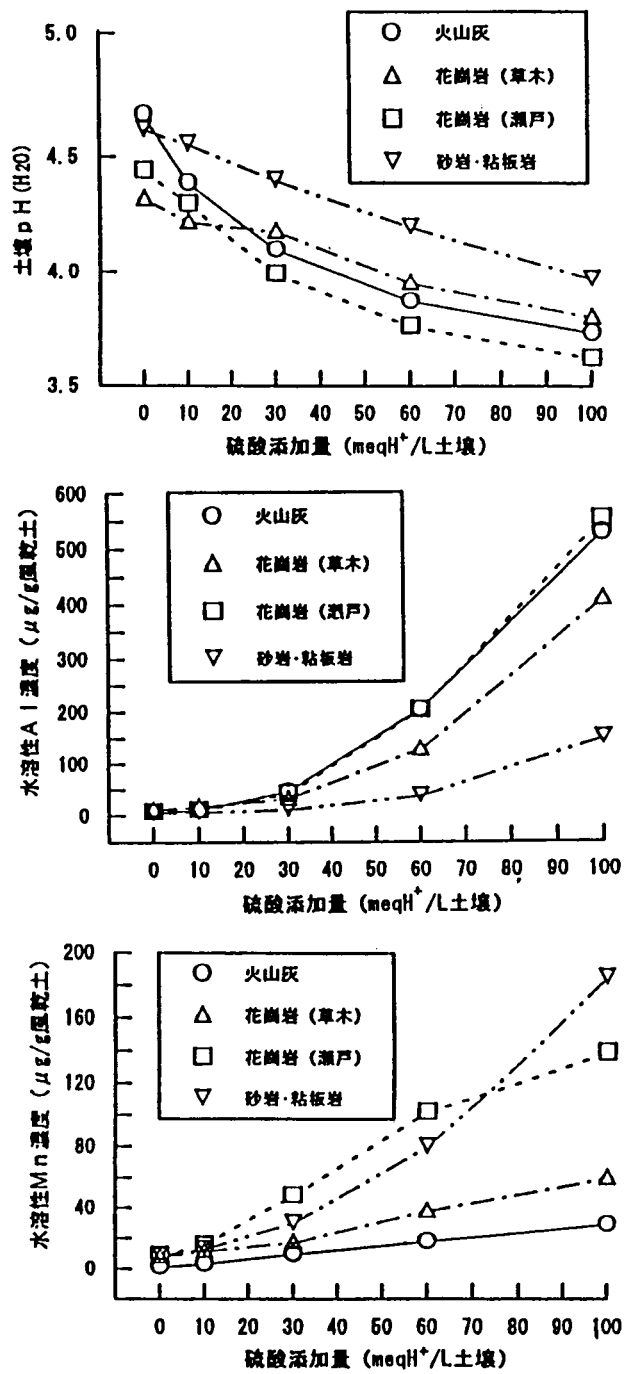


図4 褐色森林土への硫酸添加量と土壌pH、水溶性Al濃度および水溶性Mn濃度との関係。

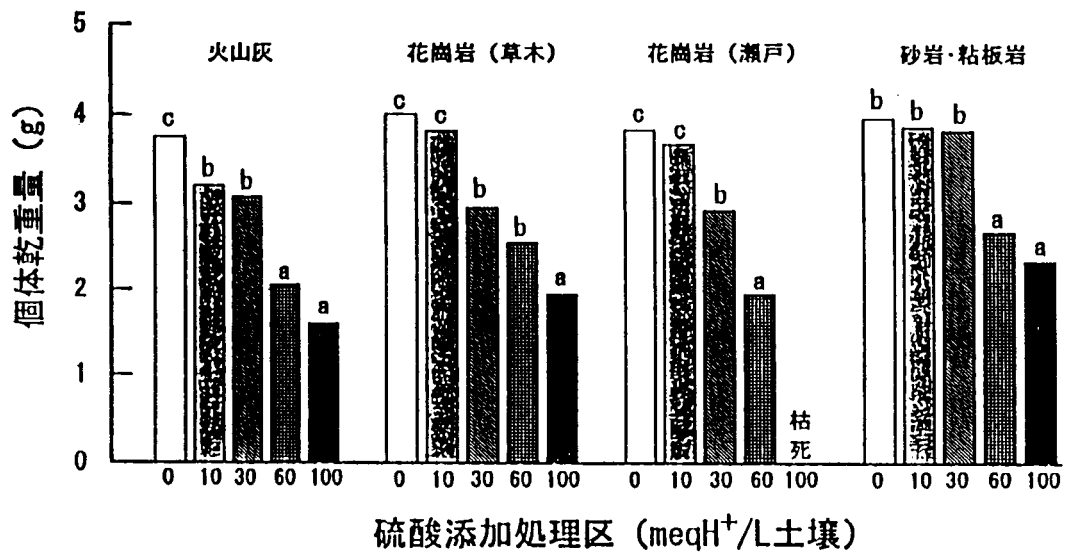


図5 各硫酸添加処理区で12週間育成させたスギ苗の個体乾重量. 異なるアルファベットが付いた値間には、有意差がある(p<0.05).

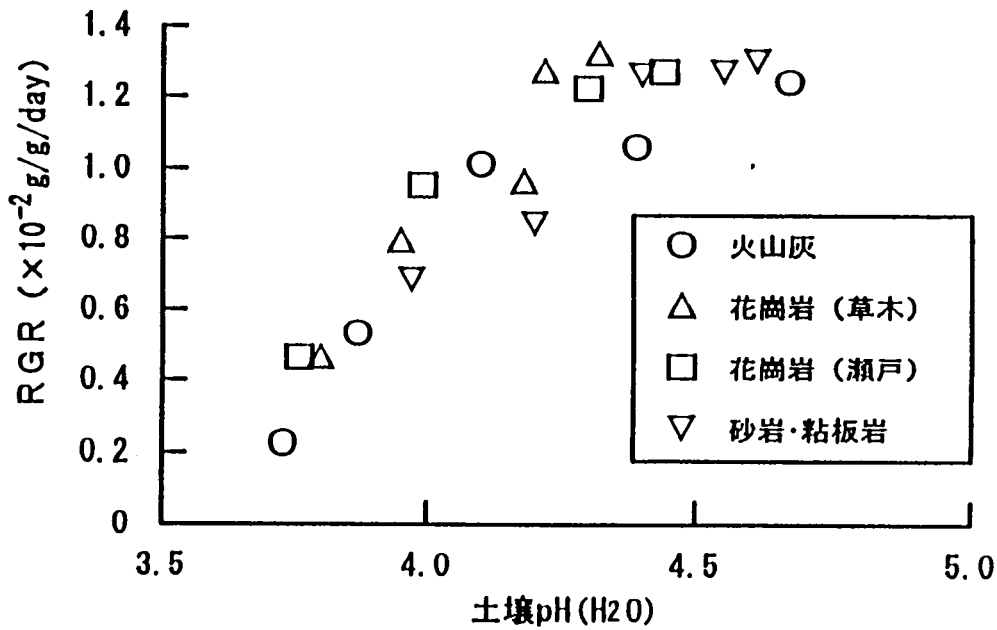


図6 土壌pH(H₂O)とスギ苗の相対成長率(RGR)との関係.

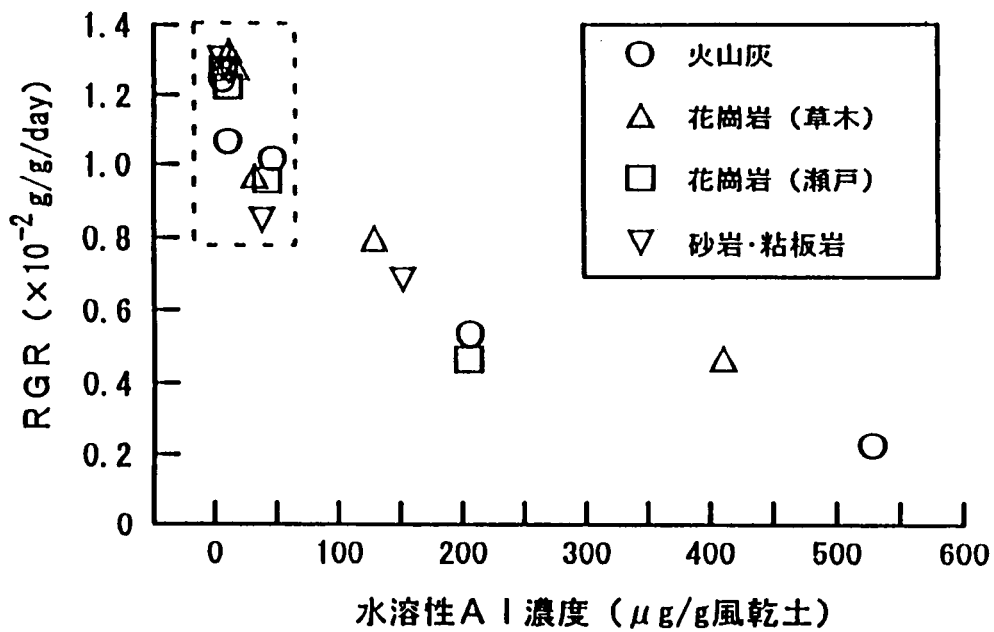


図7 土壤の水溶性Al濃度とスギ苗の相対成長率(RGR)との関係。

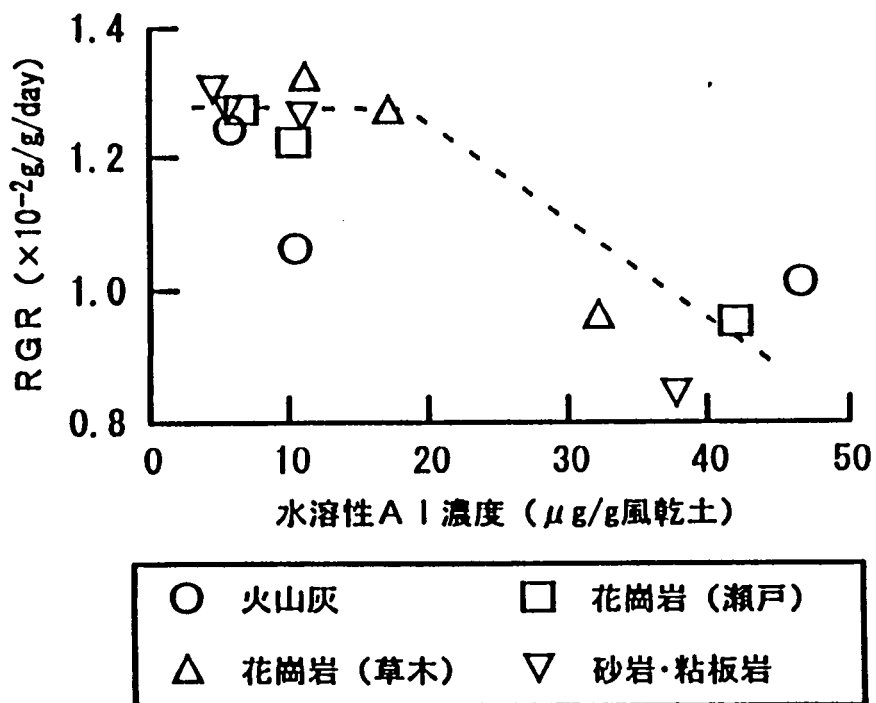


図8 土壤の水溶性Al濃度とスギ苗の相対成長率(RGR)との関係(拡大図)。

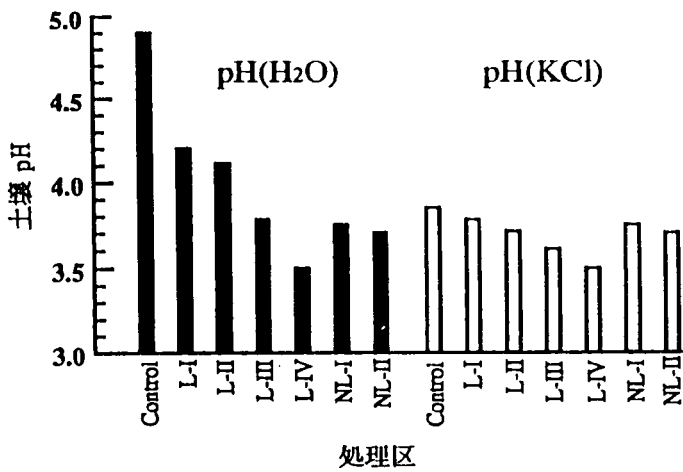
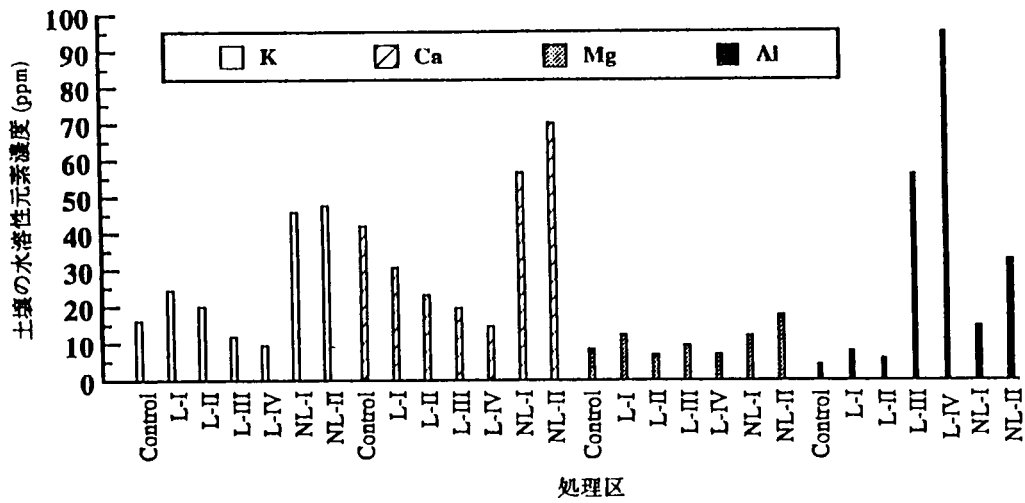


図9. スギ苗の育成開始時における土壌のpHと水溶性元素濃度

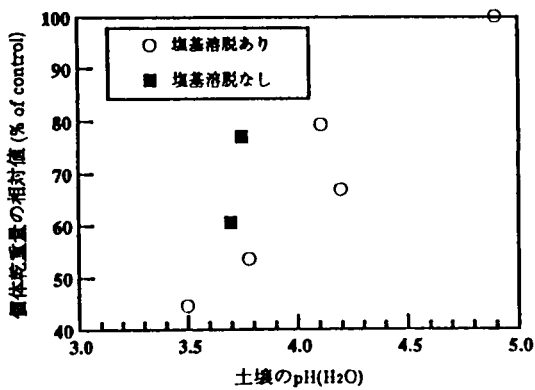


図10 土壌pH(H₂O)とスギ苗の個体乾重量の相対値との関係。

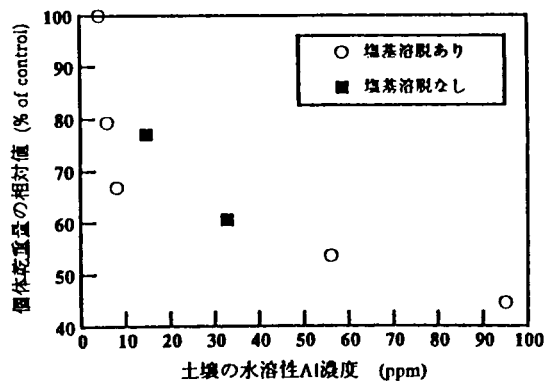


図11 土壌の水溶性Al濃度とスギ苗の個体乾重量の相対値との関係。

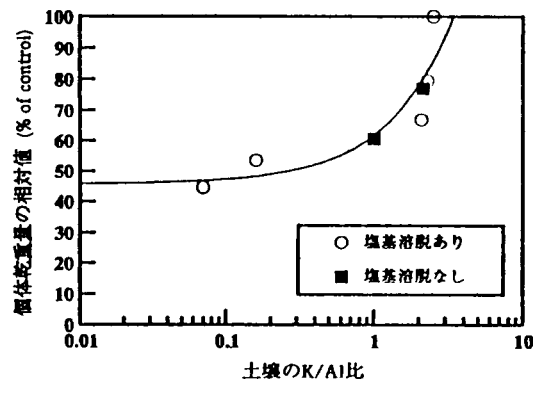
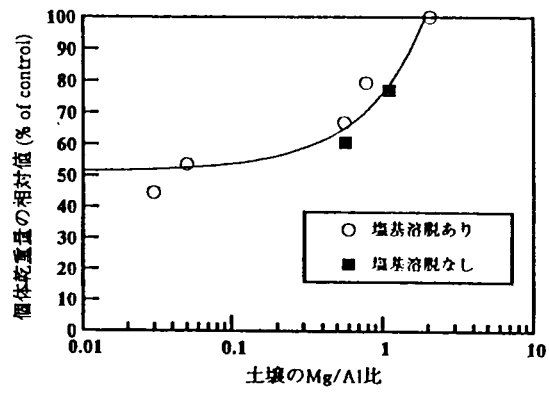
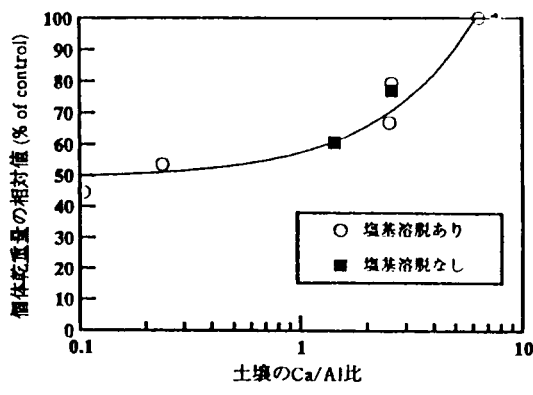


図12 土壌におけるカチオンとAlのモル比とスギ苗の個体乾重量との関係.

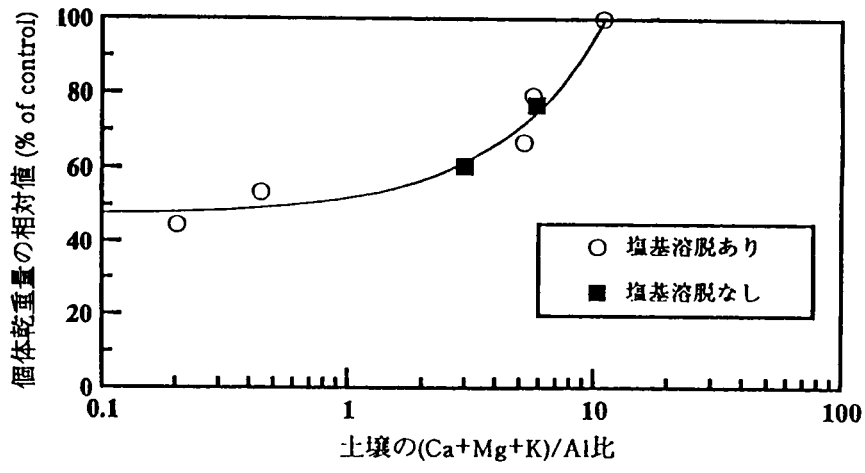


図13 土壌の(Ca+Mg+K)/Al比(モル比)とスギ苗の個体乾重量の相対値との関係.

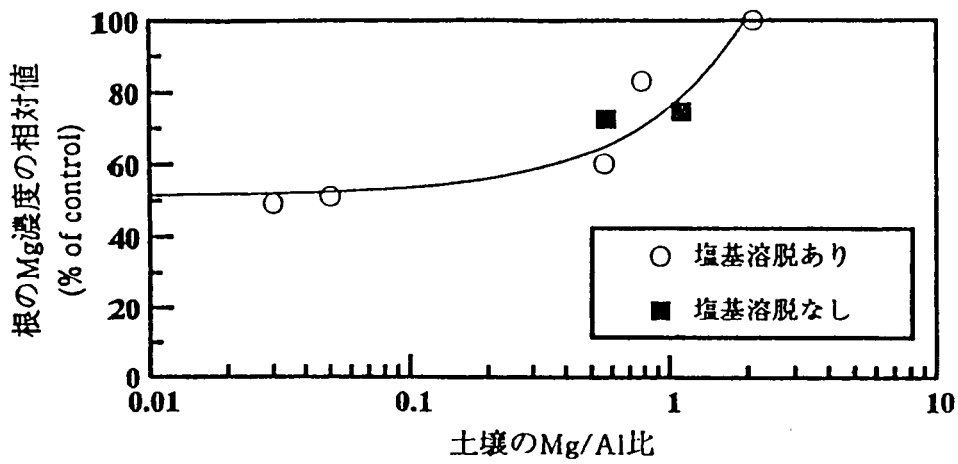


図14 土壌のMg/Al比(モル比)とスギ苗の根におけるMg濃度との関係。

★ *Cryptomeria japonica* D. Don

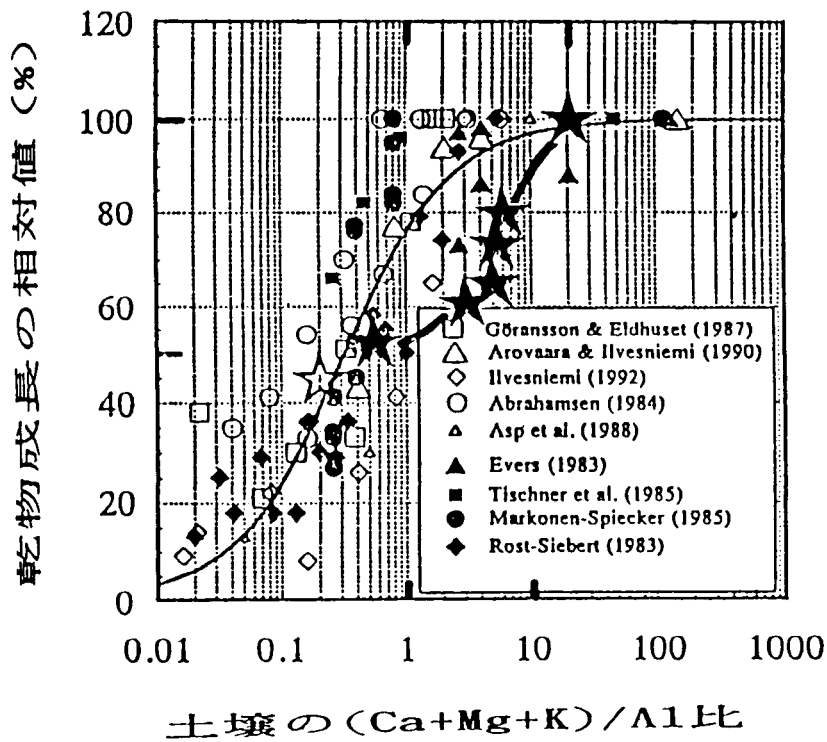


図15 ノルウェースプルス苗とスギ苗の乾物成長と土壌の(Ca+Mg+K)/Alモル比との関係。 Sverdrup et al. (1994)の図に、本研究で得られたスギ苗のデータをプロットした。