

C-2. 植物に与える酸性及び酸化性物質の影響に関する研究

(1) スギ林における酸性降下物等の動態解明と影響予察に関する研究

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	植物生態科長	森川 靖
	環境生理研究室	松本陽介・重永英年・上村章・丸山温
	養分動態研究室	赤間亮夫・西本哲昭・溝口岳男
	立地評価研究室	小林繁男・森田佳行・田中永晴
	土壌化学研究室	石塚和裕・的場節子・高橋正通
	土壌物理研究室	松浦陽次郎・加藤正樹・荒木誠
森林生物部	土壌微生物研究室	岡部宏秋
生物機能開発部	生理機能研究室	長尾精文・横田 智・田崎清
木材利用部	木材特性科長	太田貞明
	材質研究室	平川泰彦
関西支所	造林研究室	清野嘉之・加茂皓一・井鷲裕司
	土壌研究室	鳥居厚志・金子真司

農林水産省 農業環境技術研究所

環境管理部	資源・生態管理科長	陽捷行
資材動態部	多量要素動態研究室	樋口太重・尾和尚人
環境管理部	影響調査研究室	鶴田治雄・神田健一・八木一行
(委託先)	群馬県林業試験場	近藤次雄
	富山県林業技術センター	安田 洋

平成2年度－4年度合計予算額 57、795千円

〔要旨〕

広域に衰退が確認されている関東地方平野部のスギ林を中心として、スギ林衰退の実態を明らかにし、その機構解明と影響予察法の開発を行うために、酸性降下物等の動態、樹木生理の特性、土壌の緩衝能等について調査・研究を行い次の成果を得た。

関東地方及び関西地方におけるスギ衰退の実態を調査・解析し、高齢で高樹高のスギの衰退が進んでいること、孤立木や林縁木の衰退が顕著であり林内では衰退が軽微であること、衰退は現在でも進行していることを明らかにした。

スギ林において林外雨、林内雨、樹幹流のpH及び溶存成分を測定し、酸性降下物の流入量とその特性を明らかにした。また、スギの樹幹流の酸性化の実態と樹幹周囲の土壌の酸性化の実態を明らかにした。

土壌から揮散する窒素及び硫黄化合物の測定法を開発し、揮散量の推定法を確立した。

人工酸性雨散布実験の結果、現在観測されている程度の酸性度の降雨ではスギに対して直接の被

害はないと判断した。

蒸散量が多く通導抵抗が高いというスギの水分生理の特性を明らかにし、気温の上昇や乾燥化の実態からこの特性は衰退に係わる因子と推定した。また、成長と環境因子とを統計的に解析した結果、衰退に対する寄与率の高いのは気温であることを明らかにした。

スギ林の窒素及び硫黄の吸収量を明らかにするとともに、衰退度が高くなるに従って葉のアルミニウム濃度が高くなり、カリウム濃度が低下することを明らかにした。

土壌の緩衝能の測定法を開発するとともに森林土壌の緩衝能の発現機構を解析し、緩衝能には炭酸塩、塩吸着、交換性塩基及びアルミニウムの溶出の4段階あること明らかにした。また、主要森林土壌の緩衝能を測定し、森林土壌の表層部では緩衝能が低いこと、すでに酸性化している土壌の緩衝能は低いことを明らかにした。

〔キーワード〕酸性降下物、スギ林衰退、水分生理、土壌の緩衝能、樹幹流

1. 序

ヨーロッパ、北アメリカにおいて酸性雨によるとされる森林衰退が問題となっている。わが国においても1985年に関東地方のスギの衰退と酸性降下物との因果関係について問題提起がなされた。スギ林衰退現象については、環境庁及び林野庁によって緊急調査が実施されたが、衰退原因の確定されなかった。その後も森林衰退の情報は各地からもたらされ、樹木・森林の衰退は社会的にも注目を集めているがその原因は確定されていない。これまでの観測・調査によると、わが国における降雨の酸性度は欧米とほぼ同じであり、いわゆる酸性雨が全国的に降っていることが明らかになっている。森林生態系は複雑な系であり、酸性降下物による影響は不明な点が多い。また、その影響は慢性的・蓄積的であり、影響が顕在化した場合には回復が困難である。森林生態系の破壊は環境にも多大の影響を及ぼす。このため、酸性降下物が樹木あるいは森林生態系に与える影響の解明と予測法の確立が求められている。

2. 研究の目的

関東平野でみられるスギ林の衰退は、わが国で最も広範囲に確認されている森林の衰退現象である。スギ林の衰退は北陸地方あるいは都市化が進行している関西地方でも確認されている。本研究では、林地に流入する窒素及び硫黄等の酸性物質の実態やそれら成分の土壌中における動態を明らかにするとともに、樹木の生理的特性あるいは土壌の緩衝能の解明を行い、さらには、年輪構造や立地因子を解析することにより、酸性降下物によるスギ林衰退の機構について究明し、酸性降下物がスギ林に与える影響の予察技術を開発する。

本研究の課題構成は次のとおりである。

- (1) 林地に流入する窒素及び硫黄動態の実態解明
- (2) 酸性降下物によるスギ林衰退の機構解明
- (3) 予察技術の開発

3. 研究の方法

- (1) 林地に流入する窒素及び硫黄動態の実態解明

スギ林において林外雨、林内雨、樹幹流の量とそのpH及び溶存成分を測定し、流入する酸性

降下物の質と量の特性を解析する。また、土壤に及ぼす樹幹流の影響を解析する。土壤から揮散する窒素及び硫黄化合物についてはその測定手法を開発し揮散量の推定法を確立する。

(2) 酸性降下物によるスギ林衰退の機構解明

平野部のスギ林の衰退の分布、形態等の実態を把握する。酸性降下物が樹木の養分吸収、光合成・呼吸、水分生理及び発芽生理等に与える影響を実験的手法等を用いて解析する。土壤の緩衝能については、測定手法の開発を行うとともに酸性化とそれに伴う成分の溶出から緩衝能の発現機構を解析する。また、主要森林土壤の緩衝能を測定しその実態を明らかにする。衰退要因を土壤因子や気象因子から解析する。年輪構造解析により環境変動と衰退の関係を解析する。

(3) 予察技術の開発

スギ衰退に係わると考えられる酸性降下物の実態、土壤の酸性化の実態、環境変動の実態、スギの生理的特性及び土壤の緩衝能を総合的に解析し、現在進行しているスギ林衰退の主要な因子を確定し、酸性降下物の影響予察法を開発する。

4. 結果と考察

本課題は実行課題数が多岐にわたるので、実行課題毎に研究目的と方法を簡単に述べる。

(1) 林地に流入する窒素及び硫黄動態の実態解明

①多雪地帯における酸性降下物の特徴

目的：日本海側の多雪地帯における酸性降下物の流入量の特徴を明らかにする。

方法：富山市北代と山間部の立山町吉峰において林外雨、林内雨及び樹幹流の量と質を調査した。

結果及び考察

林外雨のpH平均値は山地で4.60、都市近郊では4.77となり、いずれの試験地でもいわゆる酸性雨であった。林内雨のpHは、吉峰試験地では林外雨に比べやや低い値で推移するが、北代試験地では逆に高い傾向にあった。樹幹流のpHは両試験地とも極めて低い値を示し、吉峰試験地で3.60、北代試験地で3.75であった。試験地間における各々のpH値の違いは、主に都市近郊の人為影響による大気環境に起因し、春先にみられる降水pHの上昇傾向は、フェーン現象や黄砂現象の影響による緩衝作用の結果と考えられた。表1に降水（林外雨）による年間負荷量を示した。林内雨及び樹幹流中の成分濃度は常に林外雨より高く、林外雨<林内雨<樹幹流の関係にあり、都市近郊では山地のスギ林に比べいずれも高い濃度を示した。どの成分濃度も概して秋から冬にかけて高まりがみられ、ことに SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 及び Mg^{2+} などの海塩粒子に由来する成分ではその傾向が明らかであった。林内雨の無機態窒素量は、山地の2.3g/m²に対し都市近郊の5.4g/m²と明らかな違いが認められた。

表-1 降水中成分の年間負荷量

試 験 地	降水量 mm	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
		mg/m ²							
北代試験地	2196	6693	2027	9882	1370	1074	586	5404	1364
吉峰試験地	2679	5696	2487	7218	1317	757	347	3626	1084

②関東地方における酸性降下物流入量

目的：群馬県下にて酸性降下物等の流入量を明らかにする。

方法：スギ林を対象に群馬県高崎の八幡神社、榛東村及び吉岡村において林外雨、林内雨の量と

質を調査した。榛東村と吉岡村では樹幹流の調査もあわせて行った。

結果と考察

林外雨のpH値は3.4～7.8の範囲にあった。近接した調査地吉岡と榛東では、pH6.0～6.4の試料数が最も多く、次いで4.0～4.4の間であるが、全試料の半数以上はpH5.5以上を占めた。八幡での林外雨のpH値は3.6～7.6の範囲にあったが、pH5.5未満の試料が65%程度を占めた。林内雨のpH値は3.9～7.8の範囲にあり、吉岡及び榛東と八幡の分布パターンが異なっていた。樹幹流は、吉岡では試料の多くがpH3.5～3.9の間に集中し、pH4.5以上の試料が極め

て少ないが、榛東ではpH5.0以上の試料が多く、分布の範囲も広い等、調査地間に違いがみられた。年平均pHは、高齢林分（吉岡）では樹幹流<林外雨<林内雨、若齢林分（榛東）では林外雨<樹幹流<林内雨の傾向にあった。溶存成分は、い

ずれの成分も冬季に濃度が高くなる傾向にあった。溶存成分の年平均濃度は、若齢林分（榛東）の一部成分を除き各成分とも樹幹流>林内雨>林外雨の傾向にあった（表2）。

表-2 降水中成分の平均濃度

単位 EC:μS/cm 濃度:mg/l

調査地	区分	EC	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
八 幡	林外雨	30	4.8	0.49	0.17	0.43	0.41	1.32	1.11	2.86	2.98
	林内雨	143	5.2	6.44	1.77	4.89	1.07	7.83	11.4	14.2	22.6
吉 岡	林外雨	28	4.6	0.35	0.13	0.38	0.39	1.60	0.95	2.74	2.87
	林内雨	62	5.4	2.03	0.46	1.38	0.74	4.88	4.03	7.03	8.43
	樹幹流	242	3.7	5.89	1.03	3.31	1.34	14.8	9.51	37.8	25.7
榛 東	林外雨	28	4.7	0.31	0.12	0.31	0.39	1.61	0.97	2.66	2.82
	林内雨	44	5.5	1.08	0.31	1.82	0.48	3.80	2.16	4.38	6.14
	樹幹流	83	5.1	0.46	0.28	3.75	0.87	8.10	4.10	8.74	11.6

③スギ樹幹流の水質形成過程

目的：高齢のスギ樹幹流の酸性化傾向が確認されたので、樹幹流の水質形成過程を検討する。

方法：茨城県稲敷郡茎崎町のスギ林において梢端部、樹幹中部、樹幹下部の樹幹流を採取しその水質形成過程を解析した。

結果と考察

降水の年間平均pHは4.8であり、樹幹流の年間平均pHは梢端部:5.0、樹幹中部:4.1、樹幹下部:3.2であった。樹幹流は流下するにしたがい、溶存物質濃度が1～2オーダー高まった。濃度上昇はNH₄⁺・Cl⁻・NO₃⁻・SO₄²⁻・TOCでしばしば顕著であった。

採取位置を変えた樹幹流測定の結果から、樹幹流に含まれる物質の70～90%は、周囲の林冠層から突出した樹冠部分で捕捉された湿性／乾性降下物と樹体からの溶脱成分と考えられる。

④樹幹流による土壌の酸性化の実態

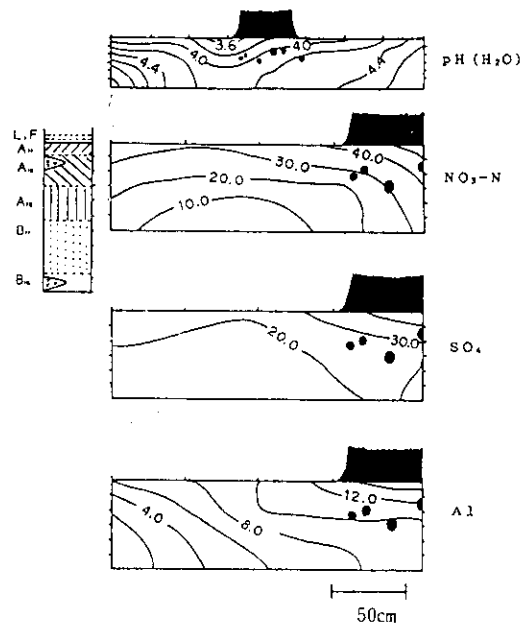
目的：酸性化しているスギ樹幹流が土壌に与える影響を明らかにする。

方法：関東平野においては衰退地、非衰退地8箇所樹幹周囲の土壌の酸性化を調査した。また、高崎市（八幡神社）・吉岡村（吉岡試験地）・宮城村（赤城神社）において、土壌水に溶存する成分を調査した。富山県下では、タテヤマスギ林分と60年生のコナラ林分にて樹幹周囲の土壌の酸性化と土壌水の成分の調査を行った。群馬県下では林齢70年生前後の山地のスギ及び赤城

山の95年生のダケカンバを対象に酸性化の実態調査を行った。

結果と考察

スギ衰退地域・非衰退地域のどちらでも、老齢大径木周辺では樹幹から離れた周辺部より樹幹周囲ほどpH値が低かった。衰退地域のスギ樹幹の周囲ではpH(H₂O)が3.5前後まで低下している場合もあったが、非衰退地域ではおおむね4.5以上であった。樹幹周辺（樹幹周囲から1～2m離れた採取点）では、樹幹周囲よりもpH(H₂O)が0.4～1.5高く、衰退地・非衰退地でその傾向に違いは認められなかった。また、若齢木周辺ではpHの低下は認められなかった。樹幹直下では、深さ50cm程度までpH(H₂O)4.0前後で、樹幹流の影響が認められた。土壌の水溶性成分を調査した結果、八幡神社・吉岡試験地では土壤水に溶存する硝酸イオンや硫酸イオンの濃度が、スギの衰退が認められない赤城神社より4～5倍高かった。衰退程度の高い八幡神社で、土壤水に溶存する硝酸・硫酸イオンの濃度が最も高く、根際直下では水溶性アルミニウムが最高20mg・L⁻¹前後という高濃度で土壤水に溶存していた（図1）。



図－1 スギ樹幹下のpH及び土壤水の物質濃度。
高崎市八幡神社の例。
(pHについては幹の両側2m, NO₃-N, SO₄, Alについては片側2mを図示。濃度単位: mg/L)

富山県下における調査結果では、スギ樹幹周囲の土壌pHは、5.17～4.54の範囲にあり、樹幹からの水平距離が40cm以内の範囲では深層までpHは低い値になる傾向が認められた。コナラでは、平均値は5.1でスギ林土壌よりもやや高い値を示し、スギ林でみられたような樹幹直下のpHの低下は認められなかった。土壌溶液中のアニオン濃度はスギ林、コナラ林とも樹幹の周辺で成分濃度の高まりがみられることから、樹幹流の影響が強いものと考えられた。

群馬県下における調査結果では、樹幹近くと外周pHの差は最大で2.2、最小で0.7の開きがあった。いずれの調査地においても樹幹周囲はpHの低い等値線で囲まれ、樹幹に向かって土壌pHが低くなる傾向にあった。この傾向は特にスギ大径木で顕著である。ダケカンバの場合は、地際部からの距離別平均pHに差が認められるもののその差は小さい。

⑤スギにより吸収される窒素及び硫黄量の推定

目的：酸性降下物の主要な成分である窒素と硫黄がスギによって吸収される量を推定する。

方法：衰退林（高崎市八幡）と比較的健康な林（つくば市谷田部）において枝葉の窒素と硫黄の含有率を測定し、窒素及び硫黄の吸収量を推定した。また、茨城及び千葉県において衰退、非衰退林の葉の養分含有率を測定した。

結果と考察

窒素についてみると、1年生葉と枯死葉では、健全林の方が衰退林よりも含有率が高く、当年生葉では両者の差は少ない。樹冠の位置の違いでは、当年生葉は中央部で含有率が高く、1年生

では下部で高い。硫黄についてみると、当年生、1年生、枯死葉とも健全林の方が含有率が高かったが、その傾向は特に枯死葉で著しかった。樹冠の位置別にみると、当年生葉では樹冠の下部で高かったが、1年生では明瞭な違いは見られなかった。

調査林分が閉鎖していると仮定して、樹体の大きさと窒素含有率からスギによる窒素の吸収量を算出すると衰退林の八幡試験地では40kg/ha・year以上となり、健全林の谷田部試験地ではさらに多くなる。硫黄についてみると、八幡試験地では4～6 kg/ha・year、谷田部試験地では7～10 kg/ha・yearとなる。

⑥地表から揮散する窒素化合物の計測手法の開発と揮散量の推定

目的：林地から揮散する主要な窒素化合物である亜酸化窒素（ N_2O ）の計測手法を開発するとともに揮散量の推定方法を確立する。

方法： N_2O の連続自動測定装置について検討した。また、スギ林土壌を対象にオープンチャンバー法にて N_2O 濃度を連続測定し、揮散量の推定方法を検討した。

結果と考察

N_2O 測定装置の基本システムとして非放射線源（グロー放電）式ECD検出器を装備したガスクロマトグラフにオートガスサンプラーを連結し、自動測定装置を組み立てた。短時間の連続測定した場合には平均値319ppb、変動係数は0.8～2.8%であった。既知量の N_2O を放出し、回収率を検討した結果、 N_2O 揮散量が30～150ngN/m²/secの範囲で、回収率が98.9～104.4%となった。また、 N_2O 揮散量が低い8.0ngN/m²/secについて、40時間連続測定した場合には、約1時間8回の測定値の変動係数は5%以下、平均値は8.1ngN/m²/secであった。以上のように、オープンチャンバー法による揮散 N_2O の高精度で安定な測定が可能になった。

本システムを用い現地において揮散速度を測定した結果、晴天時では揮散速度の日変化も小さいことが明らかとなった。しかし、およそ1mm以上の降雨量になると、揮散速度が降雨前に比べて高くなり、そのレベルが1日程度維持される場合が多かった。 N_2O 揮散速度（ Y ：ngN/m²/sec）の測定値を非降雨日と降雨日に分別して、それぞれについて平均気温（ X ：℃）との関係を解析すると、両者の間には次式のような高い相関関係が認められた。

非降雨日： $Y = 10.2X - 79.8$ （ $r = 0.868$ ）、降雨日： $Y = 17.2X - 113.8$ （ $r = 0.842$ ）

この関係式と毎日の平均気温および降雨量を用いて、1990年の N_2O 揮散量を推定した結果、年間合計363.8g/haとなった。

⑦地表から揮散する硫黄化合物の計測手法の開発

目的：地表から大気へ揮散する主要な含硫ガスとしてジメチルサルファイド（ CH_3SCH_3 、以下DMSと略称）、硫化カルボニル（COS）および二硫化炭素（ CS_2 ）の3種が考えられている。土壌から大気へ揮散する含硫ガス成分の計測手法を開発するとともに揮散量を推定する。また、スギ林衰退と含硫ガス揮散量との関係について調査する。

方法：クロードチャンバー法による試料採取方法、ガスの濃縮方法及びガスクロマトグラフによる検出方法を検討した。スギ林非衰退地2地点（つくば市台面野井、つくば市観音台）および衰退地1地点（高崎市八幡町）で揮散量を測定した。

結果と考察

土壌に設置してある枠にチャンバーを静置し、数分及び10～30分後にチャンバー内空気を採取した。採取気体は液体窒素を用いた低温濃縮法により濃縮し、分離・測定はFPD検出器付きガスクロマトグラフを使用した。このような方法により、土壌からのDMSおよびCS₂のフラックスの測定が可能となった。カラムによるDMSの分離とピーク高さの再現性も良かった。一方、COSとH₂Sの分離はうまくいかなかったが、大気中のH₂S濃度はCOSに比べて低いので、COSだけのピークとしてもほとんど問題は起こらないと考えられた。CS₂はメタンチオール(CH₃SH)のピークと重なることがたまにあった。メタンチオールは耕地土壌では若干の放出が認められるので、ここでのCS₂の放出量はメタンチオールを含んだ値となった。

含硫ガスフラックスの季節変動では、春から夏にかけて大気から林地へ吸着され、秋から冬にかけて林地から大気へ放出された。林地からの放出量の最大値は観音台の12月に観察され、CS₂の13ng S m⁻² min⁻¹であった。スギ林地からの含硫ガスの年間発生量はCS₂でわずかにあったが、COSは土壌への吸着量の方が多く、DMSでは発生も吸着もほとんど無かった。その結果、含硫ガス全体の年間を通した収支では林地への吸着となった。

(2) 酸性降下物によるスギ林衰退の機構解明

①酸性降下物の樹木に与える直接の影響

目的：人工酸性雨の散布やオゾンの暴露試験を行いそれらが樹木の生理活性等に与える影響を明らかにする。

方法：実験1：人工酸性雨をスギ苗に2.5mm/回の割で、日に2回、約4ヶ月間処理した。実験2：人工酸性雨を地上部だけにかかるように処理し、3～5回/週の割で、約1ヶ月半行った。実験3：実験2とほぼ同様な処理に加え、オゾンとの複合処理(0.1ppmで、連続5時間/回、5回/週の割)を、約3ヶ月行った。実験4：実験2とほぼ同様な人工酸性雨処理を約1ヶ月間行った後、3時間高濃度のオゾン処理を行った。いずれの実験においても可視被害の観察および、成長量の測定、無機養分分析、および光合成・蒸散速度の測定等を行った。

結果と考察

実験1：処理終了時の培地表層のpHは、対照区で6.2、pH4区で5.5、pH3区で4.6、pH2区で3.5であった。葉の変色はpH2で明らかであったが、pH3または4では明らかではなかった。D²H成長経過および乾物成長は、対照処理にくらべ、pH2では著しく、pH3と4では明らかに悪化した。一方、葉のクロロフィル含量および窒素含量は、処理間でほとんど差がなかったが、光合成速度では、pH2で明らかに低い傾向が認められた。

実験2：pH2.5区においても可視被害は認められなかった。光合成速度には、処理の影響は現れなかった。酸性物質の植物体への直接的影響は、ワックス層のある葉ではなく、枝の樹皮層から直接吸収され、形成層の成長を妨げることに現れることが示唆された。

実験3：可視被害はpH2.5+オゾン処理区を含め、すべての処理区で認められなかった。光合成速度および水蒸気拡散コンダクタンスを検討した結果、人工酸性ミスト処理だけではpH3.5および4.5区でわずかに気孔開度が増加し、pH2.5では逆に低下すること。オゾンとの複合によりいずれの処理区でも気孔開度は増加し、pHの低い処理区ほどその傾向が顕著になることが明らかになった。このことから高濃度のオゾン(0.1ppm)に長い期間(ここでは5時間/日で約60日間)暴露され、しかも酸性度が低い降下物が常時降り続けば、気孔開閉調節に異常をきたし、大きな水ストレス

を受けやすくなることが示唆された。

実験4：可視被害の発生は、pH処理に関わりなくオゾン濃度1.0ppm以上で認められ、気孔開度調節に明らかな異常が認められた。可視被害の発生しなかったオゾン濃度0.5ppm区でも、気孔開度が増加する傾向が認められ、水ストレスを受けやすくなることが示唆された。

以上の結果から、pH2.0の酸性物質の降下条件では、光合成活性の低下や気孔開閉調節異常などの不可視被害も現れるとともに、葉に明らかな可視被害が現れ、葉量や成長量の低下が生じる。また、0.5ppm以上の濃度のオゾンに数時間以上暴露されれば、葉の変色等の可視被害のみならず水ストレスを受けやすくなり、葉の枯死や新しい葉の展開阻害のため、衰退の契機になると考えられる。しかし、現在の降雨のpHであるpH4台では可視被害は現れず、成長速度や光合成活性および気孔開閉調節への影響は少なく、枯死・衰退に結びつくほどの直接的影響は受けていないと評価された。同様に、現在の関東地方の年平均オゾン濃度は0.04ppm以下、SO₂濃度は0.01ppm程度以下、NO₂濃度は0.03ppm程度以下であるが、この程度では大気汚染ガスが原因で可視・不可視被害は発生しにくいと判断された。

②衰退樹木の形態的变化と成長

目的：衰退の経年変化、形態的特徴から衰退要因を解析する。

方法：衰退の進んでいる茂林寺と鷲宮神社境内林を、比較的健全な林分として鹿嶋神社とつくば市台面野井私有林を調査地とし、成長や衰退度を調べた。航空写真を用い前記の4林分と箭弓神社、平林寺、荒川河川敷（熊谷市）、雷電神社、および姉ヶ崎神社の衰退の経年変化を調べた。

結果と考察

衰退木の肥大成長は悪く、特に重度の衰退木ではほとんど肥大成長をしていない。また、肥大成長の低下は60年代から認められた。衰退の経年変化をみると、調査地全体では、74,75年時点では健全木が全体の3/4強を占めていたが、79,80年では約半数に減少し、84,86年では全体のほぼ2/3の個体になんらかの衰退がみとめられた（図2）。調査地別では、周辺を広葉樹林などで囲ま

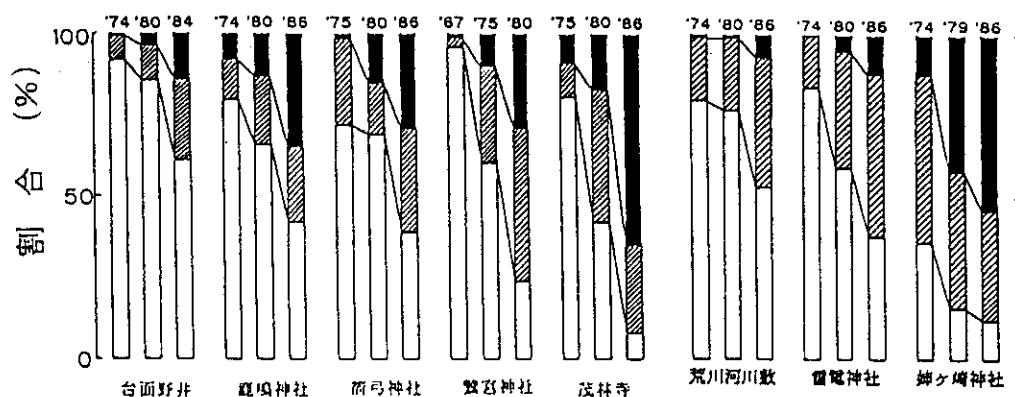


図-2 各調査地のスギ衰退の推移

□：健全、▨：梢端枯下がり、■：樹冠の大半が枯死

れた荒川河川敷、鹿嶋神社では84,86年の時点でも健全木が過半数を占めていたが、周辺の開発が急速に進んだ姉ヶ崎神社では、74年の時点で2/3の個体に衰退がみとめられ、86年では健全木はわ

ずか12%にすぎなかった。平林寺では、社殿周辺の疎林で衰退の進行が激しく、84年の時点で93%に衰退がみとめられた。しかし同じ境内林でもやや密な林分では衰退木は60%前後で、さらに社殿裏手の樹林帯内部では衰退木はみとめられなかった。このように、現在でも衰退が進行していること、孤立木や林縁木の衰退が進んでいることが確認された。

③衰退木の生理的特性

目的：樹木の水分生理特性から衰退要因を明らかにする。

方法：強度衰退木と健全木の光合成能力、木部圧ポテンシャル、蒸散速度、気孔コンダクタンス、および光合成速度の日変化を調べた。梢端部と最下部の葉について、みかけの比重、体積当たりの含水率、空隙率、最大針葉長などの形態的特徴を調べた。同時に、P-V曲線法により水分特性の季節変化を調べた。主要樹種の成木において、自然状態における光合成速度と蒸散速度の比（P/T比）、および自然状態における水分通導抵抗（土と葉の水ポテンシャル差／蒸散速度）を調べ、スギの水消費に関する特性の評価を行った。気象庁の資料（気象庁月報など）を用い、関東地方平野部の年降水量や年平均水蒸気飽差の変動を検討した。

結果と考察

衰退木の当年生葉の光合成能力は、変動幅は大きいが最大値では健全木とほとんど差はない。1年生葉では、衰退木のほうが光合成能力が低い傾向にあった。晴れた日の衰退木の光合成速度の日変化は、健全木に比べ大きな日中低下が認められた。その最も大きな原因は、気孔開度の低下であった。この傾向は、不健全葉で大きかった。しかし、スギは健全な個体であっても気孔開度の日中の低下のために光合成の低下が生じ、種としても水上げの遅れが生じやすい樹種であることが明らかになった。

樹冠上部の葉では空隙の発達が抑制され、体積当たりの含水率は相対的に高く、飽水時や絶乾時のみかけの比重も、樹冠上部で高かった。また、最大針葉長は梢端部が小さかった。飽水時の浸透ポテンシャル、しおれをおこす水ポテンシャルは樹冠上部で低く、下部と比べて圧ポテンシャルを維持しやすい性質を持っていた。これらのことから、梢端部の葉は下部と比べ、乾燥地におけると同様な水ストレスを受けていると推測された。一方、関東平野の主要樹種における、最大水蒸気拡散コンダクタンスを比べた結果、スギは水を最も消費しやすい樹種で、しかも、水利用効率の指標となるP/T比（単位蒸散当たりの光合成比）の比較の結果、光合成生産に関する水利用効率が最も悪い樹種であることが明らかになった（表3）。また、水分通導抵抗を比較した結果、広葉樹や同じ針葉樹であるサワラやヒノキに比べても大きな値を示し、吸水に遅れが生じやすい特性を有していることが明らかになった。これらのことは、スギは本来、乾燥に弱い樹種であることを示している。近年の関東平野における気象環境の変化をみると蒸散速度に大きく影響する水蒸気飽差は、この40年間にわずかつ増大していることがわかり、年降水量の減少傾向とともにスギの生育に不利な環境へと移行していることが明らかになった。

表-3 関東平野の主要樹種のP/T比

樹種名	P/T比	樹種名	P/T比
ケヤキ	8.4	マテバシイ	6.1
クヌギ	7.9	クスノキ	5.7
アカシ	7.5	モチノキ	5.5
カシ	7.3	ヤブニッケイ	5.4
イヌヅミ	7.2	オシマザクラ	5.3
シラカシ	7.0	コブシ	4.6
スダジイ	6.7	ミズキ	3.0
アオギリ	6.6	スギ	3.0

単位：mgCO₂/gH₂O

④ 土壌の酸性化とスギの養分吸収

目的：土壌の酸性化がスギの養分吸収に与える影響を実験的手法及び現地調査で明らかにする。

方法：スギ苗を養分濃度及びpHの異なる水耕液で培養し、窒素及び硫黄の吸収速度を測定した。スギ苗を植えた大型ポットの土壌へ硫酸を添加し、土壌の溶出成分とスギの生長及び成分の経時変化を調べた。各種の塩基濃度、またはpHを異にする培養液にアルミニウムを添加し、スギ苗が種々の塩基を吸収する速度に及ぼす影響を調べた。関東各地のいろいろな衰退度のスギ林の葉を採取し、塩基含有率を調べた。

結果と考察

培養液の濃度が硫酸イオンを含めて高い場合、硫酸イオンの吸収速度は低かった。培養液のpHが低いと陽イオンであるアンモニウムイオンの吸収速度は小さくなり、陰イオンである硫酸イオンと硝酸イオンでは速度は大きくなった。硫酸添加により土壌のpHは低下し、水溶性カルシウム、マグネシウムは増加した。マンガンは水溶性、交換性ともに増加した。アルミニウムも、ローム土壌では水溶性及び交換性ともに、またマサ土壌では交換性が増加した。強度の硫酸添加ポットのスギはカリウムの含有率が低く、アルミニウムの含有率が高くなり、生長は抑制された。

培養液へアルミニウムを添加すると、カルシウム濃度が高い場合カルシウムの吸収がやや抑制され、pHが高い場合にはカルシウムの吸収が促進された。マグネシウムもpHが高い場合に吸収速度が大きかった。塩基の吸収は蒸散速度との対応がみられ、この蒸散速度の調節機構がアルミニウムによって影響を受けたようである。衰退しているスギの葉ではカリウムの減少やアルミニウムの増加が認められた。

⑤ 林木の種子生産及び発芽に及ぼす影響

研究目的：酸性降下物がスギの花芽形成と種子発芽に与える影響を明らかにする。

研究方法：各種クローンの2年生挿し木に人工酸性雨を散布し、スギの花芽形成に及ぼす影響を調べた。また、母樹別の自然交配種子をpH調製した寒天培地に蒔き発芽に及ぼす影響を調べた。

結果と考察

人工酸性雨処理はスギの花芽形成を抑制した。ただし、抑制の程度はクローンによって異なり、ボカスギは硫酸のpH2.5および3.5処理区で対照区よりも多くの雄花を着けており人工酸性雨の影響が不明確なのに対して、新治2号では明らかに花芽形成が抑制され、特にpH3.5以下では雌花はまったく形成されなかった。スギ種子の発芽率は硫酸、硝酸両処理区ともpHが低くなるにつれて低下する傾向を示した。しかし、分散分析の結果は統計的に有意でなく、実験に使用した程度の酸の存在はスギの発芽に影響しないと考えられた。

⑥ 酸性降下物の土壌生物相に及ぼす影響

目的：酸性降下物が土壌生物に与える影響を生物指標性の観点から明らかにする。

方法：各生物相について吉岡、八幡、谷田部の3試験地および都市近郊スギ林を対象に比較実態調査を行うとともにスギ苗畑やポット植えのスギを用いて人工酸性雨の散布実験を行った。

結果と考察

3林分の土壌動物相を比較したところ、衰退林の一部では不健全な傾向を示したが、土壌動物の分布からは衰退地の特性を推定することはできなかった。また、スギ苗畑での5カ月間、8回

の人工酸性雨試験では、生息する大形土壌動物は一定量以下の硫酸酸性雨の降水量であれば影響を受けないと推定された。VA菌根菌のスギ根系における感染状態は、林分の間には差は認められなかった。糸状菌の実態調査では、土壌生息菌からは地域間にはっきりとした傾向はみられなかったが、林冠内は外部より菌数が多かった。スギ樹皮における糸状菌数の比較では、汚染の進行した都心地域は全糸状菌数が少なく、硫黄酸化糸状菌数が多く、一方山間部では全糸状菌数が多く、硫黄酸化糸状菌数が少ない傾向がみられた。

人工酸性雨試験は、糸状菌数は酸性雨の散布量が多いと初期には激しく減少するが、2年目には対照区の値に近づいた。その影響は土壌表層にとどまり、低濃度では総じて大きな変動はなかった。特定菌（Glomus sp）に高濃度耐性が認められた。

⑦ 関西地方における樹木衰退の実態とその立地要因

目的：関西地方の平野部のスギの衰退実態と環境条件を調べ、スギの衰退に関係している要因を明らかにする。

調査方法：滋賀、京都、兵庫、大阪、和歌山、奈良、石川の各府県にて大気汚染常時監視測定局から3km以内の社寺林を選び（253地点）、樹齢80年以上などの要件を満たすスギの衰退度と環境条件を調べた。環境条件として、孤立の程度、舗装や踏み固めの程度、8月の月平均気温、二酸化窒素の年平均濃度、オキシダント指数の5要因を取り上げた。また、年肥大成長量と気象条件との関係を調べた。

結果と考察

衰退度の大きいスギは瀬戸内気候区の大阪湾沿岸—京都盆地、奈良盆地の中北部に多く、内陸—日本海岸気候区では少ない。衰退林の分布は降水量が少なく、8月の月平均気温が高い地域と一致している。このような点から汚染物質以外の衰退要因としては夏の高温が予測された。

5要因の全組み合わせについて分散分析を行なった（表4）結果、スギの衰退に対して有意でもっとも影響の大きかった要因は、8月の気温で、他は舗装や踏み固めの程度、二酸化窒素、樹冠の孤立の程度、オキシダントの順となった。これらの要因は独立的に働いた。また、スギの肥大成長は、7、8月の平均気温が

表-4 分散分析表

	s	f	Ve	Fo	s'	p (%)
舗装	2.823	1	2.823	18.55**	2.671	17.9
孤立	1.479	1	1.479	9.74**	1.327	8.9
気温	3.875	1	3.875	25.51**	3.723	24.9
NO ₂	0.958	1	0.958	6.30*	0.806	5.4
Ox	0.484	1	0.484	3.19	0.332	2.2
気温/NO ₂	1.518	1	1.518	9.99**	1.366	9.1
(e)	3.798	25	0.152		4.709	31.5
T	14.935	31			14.935	100.0

**；有意水準1% *；有意水準5%

共に27℃以上の高温の年に衰える傾向があり、夏の高温がスギの衰退に関係しているという結果と符合した。なおオキシダント、約20年前の高濃度時期のSO₂濃度は衰退度との間に有意な関係を見出すことができなかった。またスギの根元の表層土壌が酸性化している傾向は多くの地点で明らかであったが、衰退度との関係は認められなかった。

⑧ 衰退スギ林の土壌条件

目的：衰退スギ林の土壌特性を明らかにし、衰退因子を抽出する。

方法：強度衰退林や非衰退林において土壌調査を行い物理・化学性を解析した。

結果と考察

強度衰退林である群馬県高崎市八幡神社の土壤は、表層のpHが低く塩基飽和度も低いことから何らかのインパクトが加わったと推測された。また、ここでは土壤表層や樹体の重金属含有率が高いことが明らかとなった。一方、群馬県吉岡村の弱度衰退林の近くの強度衰退林では、土壤断面調査の結果、下層にグライ斑が確認されたが土壤は乾燥しており、最近になって土壤水分環境が急変し乾燥化が進んだと推測された。また、隣接する強度衰退林と弱度衰退林を比較した結果、前者はスギカミキリ等の被害が多く、土壤の物理性も悪化していることが判明した。これらの点は、複数の衰退原因がある可能性を示唆している。

⑨ 土壤要因の劣悪化が樹木の年輪構造に及ぼす影響

目的：酸性降下物がスギの衰退に及ぼす影響を年輪構造を指標として明らかにする。

方法：過去に大気汚染被害が記録されている地域等に生育するスギを主な対象とし、酸性降下物がスギの年輪構造に与える影響を調べた。また、人工酸性雨散布が年輪に与える影響を調査した。

結果と考察：年輪構造指標の中で年輪幅と最大密度が樹木衰退の兆候を示す指標として最も適することが明かとなった。年輪幅は細胞分裂数、最大密度は年輪形成の後期の晩材細胞の壁厚を反映しているが、これらの変化には光合成量のみならずホルモン分泌が関与している。人工酸性雨散布実験においては、年輪構造の変化を特に認めなかったが、大気汚染が著しかった地域では年輪幅や最大密度の低下が一般的みられ、大気汚染による年輪構造の変化はかなり顕著であった。光合成に関係の深い葉のみならず、ホルモン分泌の主要な器官である芽に与える酸性物質の影響の検出にも本方法が有効であると考えられた。

⑩ 森林土壤の緩衝能の測定方法の開発と緩衝機構の解明

目的：酸性降下物がスギ林土壤に及ぼす影響をモデル実験を通して解析し、土壤が持つ緩衝能と耐性限界を明らかにする。

方法：人工酸性雨連続散布と流出水のpH自記記録及び溶出成分の分析により土壤の緩衝能とその発現機構を解析した。また、主要森林土壤の緩衝能を測定し、その特性を解析した。

結果と考察

土壤カラムへの人工酸性雨の連続滴下と流出液pHの連続記録及び流出液の連続サンプリング装置を組み立てた。本装置を用いて土壤に酸性物質を連続的に加え、流出液のpHと溶出する成分を分析した結果、pHは段階的に変化することやpHと溶出する成分に密接な関係があ

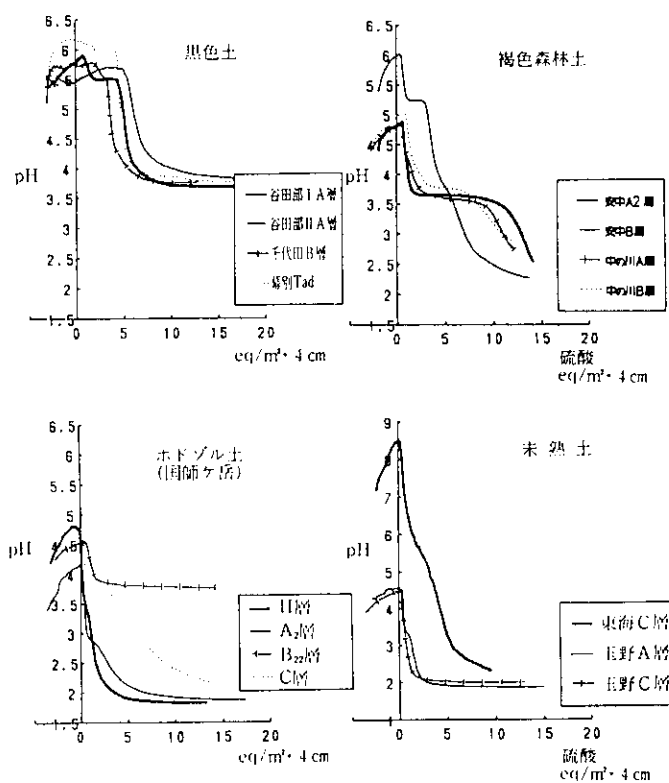


図-3 人工酸性雨散布による土壤pHの変化

ることが明らかとなった(図3)。土壌の化学性、pHの変化及び流出水の成分を解析した結果、酸にたいする土壌の緩衝作用としては炭酸塩、塩吸着(アロフェンによる陰陽両イオンの同時吸着)、交換性塩基(主にカルシウム、マグネシウム)及び酸可溶アルミニウム(交換性を含む)の段階が認められた。土壌の総合的な緩衝能をアルミニウムが溶出するpH4までに低下させる酸の量とすると、火山性黒色土と暗赤色土を除く土壌では交換性塩基量と相関が認められた。また、森林土壌では有機物を多く含む表層土壌は一般にpHが低く、緩衝能が低いこと、すでに酸性化が進んでいるポドゾルやスギ樹幹周辺の土壌の緩衝能は低いことが明らかとなった。

(3) 予察技術の開発

人工酸性雨の散布実験やオゾンの暴露実験の結果から、現在の降雨の酸性度や大気環境の状況では、スギの衰退をそれらの因子から説明することは困難と考えられた。一方、夏期の気温と成長との関係や樹木の水分生理を解析し、水ストレスにはなはだ弱いというスギの特性を明らかにした。また、関東平野各地ではすでに大気乾燥化が進行していることを明らかにした。これらは現実におきているスギの衰退を説明する上で矛盾しない因子である。

ヨーロッパでは酸性降下物による土壌の酸性化がすでに指摘されている。本調査の結果でも、酸性化した樹幹流の影響によりスギ樹幹周辺の土壌の酸性化が進んでいることを確認した。衰退地の老齢大径木周辺の土壌ほど酸性化が顕著であり、また、衰退程度の激しい地域ほど土壌水に溶存する硝酸・硫酸イオン濃度が高く、一部地域ではアルミニウムが溶出していることも確認された。このような土壌の酸性化が衰退原因であるとの確証は本研究では得られなかったが、土壌の酸性化にともなうアルミニウム溶出等が、将来衰退原因の一つとなる可能性は否定できない。

土壌の緩衝能については、その発現機構と主要森林土壌の緩衝能を明らかにした。また、酸性化が進んでいる森林土壌の表層部の緩衝能は高くはないことが明らかとなった。これらの成果は、酸性降下物が森林生態系に及ぼす蓄積的な影響を予測するために不可欠なものである。

都市部周辺の平野部で確認されている広域のスギ林衰退は酸性雨の直接の影響ではないと判断されたが、衰退機構については研究者により異なった仮説が提示されている。大気環境は一時期より改善されたがスギ林の衰退は進行している。生態系への汚染物質の負荷やその蓄積は今後とも増大すると考えられ、土壌の酸性化も進むものと予測される。また、都市化による環境の変化もスギの生育に適さない方向に進むものと予測される。このため、衰退が回復する因子は少ない。今後ともスギ衰退の推移を注意深く観察するとともに各地からもたらされている森林衰退の原因究明と環境悪化に対応するためのモニタリングを行う必要がある。

研究発表

松本陽介・小林佐保里・丸山 温・森川 靖(1990):スギ若齢木の光合成の日中低下と水ストレス. 第101回日林講要, 97

丸山 温・松本陽介・森川 靖・井上敏雄・田中信行(1990):関東平野部におけるスギ衰退の経年変化. 第101回日林講要, 121

Morikawa, Y., Y. Maruyama, N. Tanaka, and T. Inoue(1990):Forest decline in Japan. -Mature *Cryptomeria japonica* declines in Kanto plains. Proceedings of XIX IUFRO World Congress(Montreal), Div. 2, 397-405

松本陽介・丸山温・森川靖(1991):スギ樹冠葉の水分特性と光合成. 第102回日林講要, 138

松本陽介・丸山 温・森川 靖(1992):スギの水分生理特性と関東平野における近年の気象変動 - 樹木の衰退現象に関連して -. 森林立地34(1), 2-13

松本陽介・丸山 温・森川 靖・井上敏雄(1992):人工酸性雨(霧)およびオゾンがスギに及ぼす影響と近年の汚染状況の変動-樹木の衰退現象に関連して-. 森林立地34(2), 85-97

森川 靖・丸山 温・松本陽介(1992):酸性雨等による植物衰退現象の実態 - 関東平野のスギ -. 資源環境対策28(14), 1311-1315, 公害対策技術同友会, 東京

松本陽介・丸山 温・森川 靖(1993):スギ衰退の原因を考察する - 水ストレス説 -. 資源環境対策29(2), 51-56, 公害対策技術同友会, 東京

堀田 庸・森川 靖・埴田 宏・松本陽介・松浦陽次郎・石塚和裕(1993):森林の衰退 - 酸性雨は問題になるか - (わかりやすい林業研究解説シリーズNo.100). 林業科学技術振興所, 102 pp.

石塚和裕・高橋正通・高橋美代子(1990):人工酸性雨による土壌のpH緩衝能. 101回日林論, 249-252

石塚和裕・高橋正通(1990):酸性雨に対する土壌のpH緩衝能. 1989森林総合研究所成果選集

石塚和裕・松浦陽次郎・的場節子(1991):森林の表層土壌の酸性化とpH緩衝能. 102回日林論, 343-346

石塚和裕(1991):森林の衰退と酸性雨. ぶんせき, 765-768

石塚和裕(1992):土壌の緩衝能の実態と評価. 森林立地34(1), 26-35

赤間亮夫、西本哲昭、溝口岳男(1991):衰退したスギの葉の窒素と硫黄の濃度. 森林立地33(1), 16-18

松浦陽次郎・荒木誠・堀田庸(1990):関東地方におけるスギ林表層土壌のpH低下. 森林立地32(2), 65-69.

松浦陽次郎(1992):樹幹流と土壌の酸性化の実態. 森林立地34(1), 20-25.

松浦陽次郎・堀田庸・荒木誠(1990):スギ林における樹幹周囲の土壌の酸性化について. 第101回日林講要, 60

松浦陽次郎・堀田庸・荒木誠(1991):スギ老齢木の樹幹周辺の土壌の酸性化. 第102回日林講要, 86

松浦陽次郎(1992):採水位置の異なる樹幹流のpHと溶存物質について. 第103回日林講要, 59

松浦陽次郎(1993):簡易採水による降水及び樹幹流の物質負荷量の評価. 第104回日林講要, 103

堀田庸・松浦陽次郎・荒木誠(1991):スギ樹幹流による土壌の酸性化 - 土壌カラムを用いたモデル実験 -. 第102回日林講要, 79

近藤次雄(1992):スギ林に流入する酸性降下物の形態と量. 群林試研報第1号、27-34

近藤次雄(1992):樹幹流による土壌酸性化の実態解明. 平成3年度群馬県林業試験場業報.

安田洋, 藤井國博, 岡本玲子(1990):富山県における降水中の酸性降下物の特徴. 森林立地32(2), 59-64.

安田洋(1990):富山県の森林における酸性雨の特徴. 中部土壌肥料研究73, 32-42.

安田洋(1993):どんな雨が降っているか - 酸性雨の現状と地域性 -. 日本土壌肥料学会誌64, 448-455

- 岡部宏秋(1990): 人工酸性雨が硫黄酸化系状菌に及ぼす影響. 34回日本菌学会講要, 104
- 尾和尚人(1990): 地表より揮散する亜酸化窒素量の推定. 農業環境研究成果情報
- 尾和尚人(1992): 非放射線源式 E C D - G C による環境大気中の N_2O の直接連続測定, 日土肥関東講要
- 神田健一・陽 捷行(1991): ライシメータ水田からのジメチルサルファイド(DMS)のフラックスの測定. 土肥誌62, 35-40
- 神田健一(1992): 土壤生態系のガス代謝と地球環境 4 - 農耕地からの含硫ガスの発生 -. 土肥誌63
- Kanda, K. and Minami, K. (1992): Measurements of dimethyl sulfide emission from lysimeter paddy fields. Ecological Bulletins 42, 195-198
- 横田智, 長尾精文(1990): 酸性降下物がスギの花芽分化に及ぼす影響, 42回日本林学会関東支部大会
- 清野嘉之(1990): 京都市伏見区のスギの肥大成長と夏の高温、乾燥. 森林総研関西支所年報 31, 25
- 鳥居厚志(1990): 表層土壌の樹幹周囲での酸性化について. 日本林学会関西支部講演集 41, 201-202
- 鳥居厚志・清野嘉之(1991): 近畿地方のスギの衰退と表層土壌の酸性度. 大気汚染学会講演要旨集 32, 275
- 清野嘉之・鳥居厚志・加茂皓一・井鷲裕司(1991): 近畿地方と石川県のスギの衰退に関する環境要因. 大気汚染学会講演要旨集 32, 276
- 清野嘉之(1992): 近畿地方の平野部を中心とするスギの衰退について. 砺波散村地域研究所紀要 9, 1-9
- 金子真司・鳥居厚志(1992): バーク浸出液のpHとカチオン濃度. 日本林学会関西支部論文集 1, 95-96
- 鳥居厚志・清野嘉之(1992): 近畿地方の平地におけるスギ根元周囲の表層土壌のpH低下. 大気汚染学会誌 27-6, 325-328
- 鳥居厚志(1993): スギの衰退とその周辺 - 大気汚染学会等での研究動向 -. 森林科学9, 34-38
- 森田佳行・阿久沢和夫・田中永晴・荒木誠(1991): 群馬県北群馬郡の平地林におけるスギ衰退の実態とその要因. 日林関東支論42, 89-92