

## 特集(1)

## 森林資源と環境

## 森林と酸性雨

## —スギ林の衰退を中心として—

## Forest Decline and Acid Precipitation

堀 田 庸\*

Isao Hotta

## 1. はじめに

森林が地球環境を支える環境資源であるとの認識が深まるに従って、森林破壊や森林衰退の問題は、生存環境の危機として注目されるようになってきた。酸性雨は広域の汚染であり、森林や土壌に慢性的・蓄積的な影響を与えると予想される。

酸性雨は化石燃料である石油、石炭の燃焼の結果生じる硫黄酸化物、窒素酸化物が大気中で移送される過程で生成されるものであるため、人間の経済活動の拡大と切りはなせない関係にある。化石燃料は産業革命以後に大規模に利用されるようになり、大気中のCO<sub>2</sub>濃度にもその影響が現れているように近年の消費量の拡大は急激である。一方、森林生態系は長い時間をかけてエネルギーと物質の流れの複雑な「系」を構築している。環境と調和している森林生態系は、急激な環境変動や人工的に生じた汚染物質にどの程度耐えられるか不明な点が多い。

1985年に関東地方のスギの衰退は酸性雨の影響ではないかと指摘され、酸性雨と森林衰退はわが国においても日常的な話題として大々的に取り上げられるようになった。それまでも、大都市周辺の樹木衰退は指摘されていたが、その原因は光化学スモッグ、亜硫酸ガス等の大気汚染であるとされていた。事実、昭和40年代の高度成長期には大気汚染のオンパレードであった。その後、排煙の排出基準、排気ガス規制の整備と脱硫システム等の技術革新により、大気汚染は一時より軽減されたとされているが、森林衰退の報告は各地よりもたらされている。

多くの研究機関にて、衰退の実態、衰退のメカニズムについて調査・研究が進められている。また、酸性雨と森林衰退についての研究報告や研究成果の総説、一般解説書は数多くある。一般報道機関による情報の

提供や評論も数多くある。しかしながら、酸性雨の全貌や酸性雨と森林衰退との関係あるいは森林衰退のメカニズムが明らかされたとは言えない。酸性雨、酸性霧によるのではないかとされる森林衰退が報告されているが、いずれもその原因や衰退のメカニズムは不明である。

酸性雨や酸性霧が植物に与える影響等に関する詳しい総説はすでに行われているので、ここでは衰退が大面積で進行していることが確認されている関東地方平地林のスギの衰退現象を中心にして、酸性雨と森林衰退の研究の現状を紹介したい。

## 2. わが国における森林衰退の現状

干害や寒風害等の気象害、マツクイムシによるマツの枯損のような病虫害による衰退、道路開設にともなう林縁木の枯損・衰退のように原因が明らかな衰退を除くと、大規模な樹木の衰退現象が確認され問題になったのは、昭和40年代である。このときは関東地方を中心にスギとケヤキの衰退調査が行われ、衰退地図が作成されている<sup>35)</sup>。この衰退地図はその後の衰退の進行を把握する上で貴重な報告である。

その後、関東地方のスギ衰退の原因は酸性雨でないかとの発表があり<sup>36)</sup>、酸性雨と森林衰退の問題がわが国でも話題になるようになった。また、各地から森林衰退の情報がもたらされるようになった。スギの衰退は関東地方だけでなく各地でみられており、富山県、石川県の平地、関西地方の都市近郊林で衰退が確認されている<sup>16)</sup>。スギ以外の樹種では、丹沢大山のモミ、福岡宝満山のモミ、赤城山のシラカバ、広島県三次のアカマツ、苫小牧のストロブマツ、日光白根山のダケカンバ、乗鞍岳のシラビソ等が報告されている。これらの衰退の原因は酸性雨、酸性霧、大気汚染物質等ではないかとされているが、いずれも原因が確定され衰退のメカニズムが明らかにされたわけではない。

衰退の地域が広く、衰退の進行が確認されている関

\* 農林水産省林野庁森林総合研究所 森林環境部立地環境科長  
〒305 茨城県稲敷郡基崎町の里1

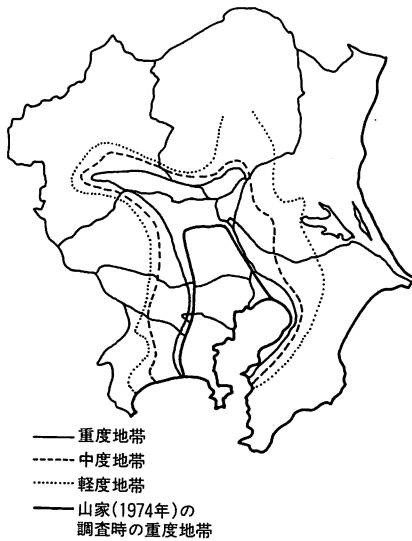


図-1 スギ林衰退の地帯区分図(丸山ら)

東地方のスギの衰退の特徴は以下のとおりである。

衰退は東京を中心に北及び北西方向に広がっている(図-1参照)<sup>11, 16, 24, 25)</sup>。ただし、標高100~200m以下の平地で衰退がみられるが、森林地帯である山地では衰退は確認されていない。衰退は樹高の高い高齢木にみられる。同じ場所であっても高齢木は衰退しているのに30年生前後の若いスギは元気であるという現象がみられる。また、面積の小さい林分や林縁木あるいは突出木の衰退が激しく、同じ場所でも大きい林分の内部では衰退がみられない<sup>14, 26)</sup>。同一林分の衰退を詳細に調査すると方向性があり、風上の林縁木の衰退が著しい現象が認められている<sup>26)</sup>。東京を中心とする都市部には現在スギはほとんど存在しないが、明治神宮の柱にはみられる。これは、周囲が広葉樹等により保護されているためと考えられる。

個体としてのスギの衰退の進行は、葉量の減少から始まり梢端部が枯れ下がる。重症になると個体としての枯死にいたる<sup>27)</sup>。

このように、スギの衰退現象の実態をみると「酸性雨」の直接被害による衰退であるとは断言できず、原因や衰退のメカニズムの解明には樹木生理と環境に関する研究を深化させる必要があると思われる。衰退の実態から「風当りの強さ」が衰退と係わっていると予測されるが、「風当りの強さ」は汚染物質の付着量や蒸散量とも係わりが深い。スギ衰退の要因として、都市周辺の気温の上昇、降水量の減少等による乾燥化も

指摘されており<sup>13)</sup>、水分ストレスがスギの衰退を解明する上での一つのキーワードになるように思われる。

### 3. 酸性雨の現状

わが国ではどの程度の酸性雨が降っているかについては、環境庁の全国的な調査等によりおよその値は明らかになりつつあり、現在も各研究機関や行政機関により精力的に調査が行われている。これまでに得られた結果によると、わが国でもpH5.6以下のいわゆる酸性雨が全国的に降っており、pHの平均は4.5~5前後であることが判っている。特異な例<sup>1)</sup>を除けば、わが国の降雨のpH値は欧米よりやや高い傾向にあるが、大きな違いはない。pHや溶存成分等の詳細についてはすでに報告されている総説等<sup>10, 21, 27, 34)</sup>を参照されたい。

一方、森林地帯の降雨に溶存する成分の調査・研究は、森林生態系の物質循環を明らかにする目的で古くから行われており、データの蓄積も多い。また、森林生態系における物質収支・循環に関する調査・研究も多い<sup>28)</sup>。これらの調査・研究は酸性雨問題が話題になる以前に行われたものが多く、酸性雨の解析を行うために必要な成分の分析が一部欠落している場合もあるが、森林生態系の物質収支に与える酸性雨の影響を解明する上での重要なバックグラウンドの資料である。これらの結果によると、都市部周辺を除くと、降水によりもたらされる成分は、窒素では6~10kg/ha前後であり、森林生態系における窒素質循環からみると少ないことが明らかとなっている。大気汚染により窒素量は増加する傾向がみられるが、生態系の養分環境を大きく変えるには至っていないと思われる。

### 4. スギ林における酸性降下物

森林生態系に流入する降雨の特性を調査する場合、雨は葉の層を通過したり、幹を伝わって流下する部分があるので、通常は①林外雨、②林内雨、③樹幹流の3項目の測定が行われる。林外雨は通常の降雨である。林内雨は樹冠(葉層)を通過した雨水であり、葉に付着した成分を洗い流すとともに葉からの溶出成分が含まれる。樹幹流は幹を伝わって流下する雨水であり、林内雨と同様に付着した成分、樹皮等から溶出成分を洗い流しながら流下する。このため、林内雨、樹幹流のpHや溶存する成分の組成・濃度は降雨と異なる。林内雨では、各成分の濃度上昇がみられ、pHは林外雨とほぼ同じかやや高くなる傾向にある。成分濃度は

表1 林外雨, 林内雨, 樹幹流の pH

期 間	降下形態	降雨水量 (mm)	水素イオン量 (meq/m <sup>2</sup> )	平均濃度 (ppm)	pH (計算値)
1989/5/29 ~	林外雨	799.9	29.93	0.0374	4.43
	林内雨	626.2	10.98	0.0175	4.76
1990/1/22	樹幹流*	19.4 (485.8)	4.58 (114.44)	0.236	3.63

\* 樹幹流は25m<sup>2</sup>に流入するとして計算した。( )内の値は1m<sup>2</sup>に流入するとして計算したものである。  
(松浦ら未発表)

都市部に近いほど高くなる傾向にあり, 汚染物質の影響が考えられる。ただし, 葉に付着した汚染物質が溶脱したのか葉から溶出したのかを区別することは技術的に困難である。樹幹流はこれまでそれほど注目されていなかったが, 最近の調査結果から特異な傾向があることが明らかとなってきた。すなわち, 林外雨, 林内雨ともpHは4.5~5前後であるのに, スギの樹幹流のpHは極端に低く, 平均でpH3.7前後であることが明かとなった<sup>19)</sup> (松浦ら: 未発表; 表1参照)。東北地方で各種の樹種の樹幹流のpHを調査した結果では, 樹種により樹幹流のpH値が異なる傾向が確認されており<sup>20)</sup>, スギの樹幹流のpHが低い傾向にあることが明らかとなっている。樹幹流も付着した汚染物質と樹皮等から溶出する成分を含むので, pH値が低下する原因は不明であるが, 汚染が少ないと考えられる東北地方でもpHが低い点から, スギ特有の現象ではないかと考えられる。樹幹流は面積的には多くないが, 幹の周辺に集中的に流下するため, 幹周辺の土壤に与える影響は大きい。

## 5. スギ林土壤の酸性化の実態

わが国の森林土壤は一般に酸性化しており, 表層のpHはおよそ4.5~6である。環境庁によるスギ衰退の緊急調査によると, 衰退と土壤のpHの間には関係が

認められないとの結果であった<sup>6, 7)</sup>。しかし, スギ林土壤の詳細なpH調査結果によると樹幹周囲の土壤が酸性化していることが確認された<sup>5, 12)</sup>。極端な場合にはpH3.6前後まで低下していた。また, 衰退している老齢木の樹幹周囲では酸性化しているのに, 若い健全木では酸性化が進行していないことも確認された(図2参照)。樹幹周囲の土壤の酸性化は下層にも及んでおり, 樹幹を中心にロート状に酸性化が進行している。この酸性化の直接の原因はpHの低い樹幹流によると考えられる。衰退地と非衰退地の比較では, 衰退しているスギ林のほうが酸性化が進んでいるとの結果が得られている<sup>12)</sup>。しかし調査点数が少ないので, 酸性化が衰退の主犯であるとの確認はされていない。

pH4前後以下に土壤が酸性化すると, 土壤中のアルミニウムが溶出し, 植物の成育に障害を与えることが知られている。土壤の酸性化が進んでいるところでは, 土壤溶液中に10ppm前後のアルミニウムが溶出していることも確認されている(松浦ら: 102日林大会口頭発表)が, 調査点数が少なく衰退との関係は未解明である。

## 6. 土壤の緩衝能

森林生態系に与える酸性雨の影響は大きく分けると, 樹木への直接の影響と土壤を介した間接の影響がある。

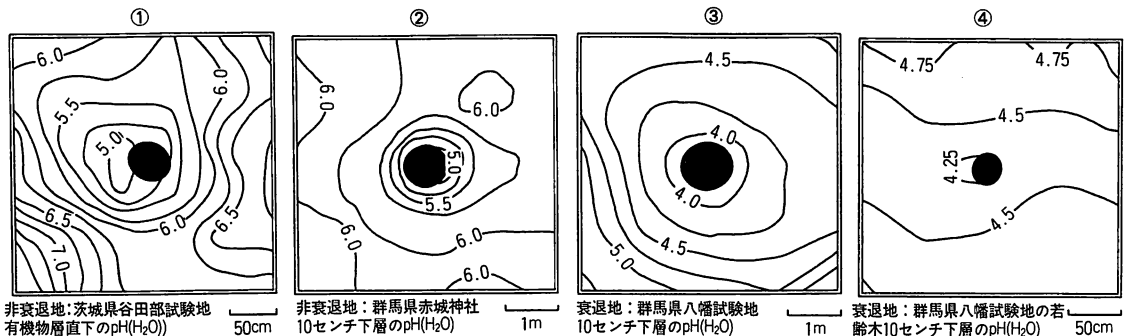


図-2 スギ樹幹周囲の土壤の酸性化 (松浦ら)

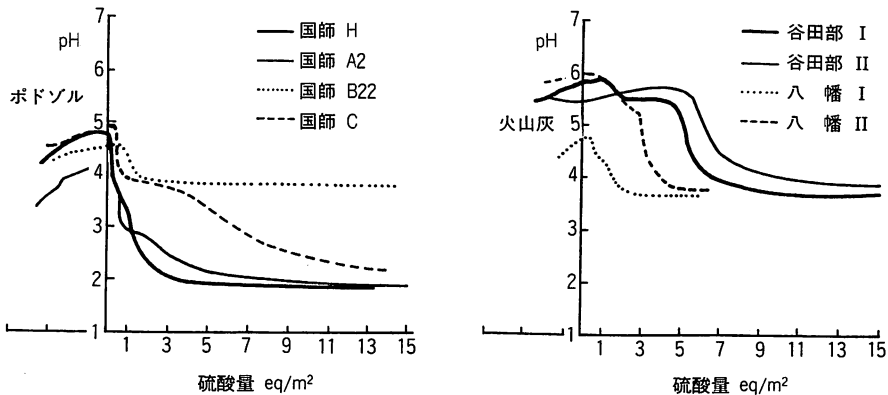


図-3 土壌によるpH緩衝能の違い：硫酸1000ppm (pH1.8)を連続24時間散布(石塚ら)

現在降っているpH 4台のいわゆる「酸性雨」による直接被害はみられないようであるが、間接の影響は蓄積的であるため注意が必要である。酸性雨の影響が問題にされている大きな理由の一つは、酸性雨が土壌に蓄積的な影響を与える点にある。土壌の酸性化は加わった酸の量に比例するのではなく段階的であるため、酸性化の影響も緩やかに現れるのではなく、あるポイントを過ぎると急激に現れる。これは、土壌の緩衝能の発現の機構による。

土壌には酸の溶液を加えても加えた溶液と同じ酸性にはならない性質がある。この性質を土壌の酸に対する緩衝能と呼ぶ。これまでの調査・研究によるとこの緩衝能は4段階あるとされている。すなわち、炭酸塩 (pH5.5~6.5) による中和、塩吸着 (pH5.5~6.3)、陽イオンの交換 (pH4.5~4.8) 及びアルミニウムの溶出 (pH3.5~4.4) である。土壌の緩衝能及び酸性化にともない溶出する成分の測定はいろいろな方法で測定されるが、酸に対する土壌の緩衝能は段階的に現れるので、土壌カラムに連続的に酸性の溶液(人工酸性雨)を流し、流出水のpHと溶存する成分を連続的に測定する方法が適している<sup>3, 4)</sup>。緩衝能や酸性化により溶出する成分は土壌の特性により異なる。各土壌の緩衝能をみると、火山灰を母材とする土壌はアロフェンを含んでおり一般に緩衝能が高い。一方、すでに酸性化しているポドゾルの溶脱層は緩衝能が低い。土壌型と各層位の緩衝能の一例を図-3に示す。

すでに1/20万の「酸性雨の土壌への影響予察図」が作成されているが<sup>8)</sup>、今後より精密な予察図を作成する必要がある。

人工酸性雨により土壌を酸性化させると炭酸塩あるいは塩吸着の段階では溶出する成分に変化はないが、

陽イオンの交換の段階になると土壌中の交換性陽イオンが溶出する。このため、酸性雨の影響は初期の段階では土壌溶液中の成分濃度を高め、富栄養になると考えられる。交換性塩基の流亡が進むと植物に必要なカルシウムやマグネシウム等の陽イオンが流亡し養分欠乏になる。さらに酸性化が進むと植物の生育に有害なアルミニウムが溶出するようになり、渓流水の水質にも影響がでると考えられる。酸性化により溶出するアルミニウムの量も土壌により異なる。火山灰を母材とする黒色土は酸性化にともないアルミニウムを多く溶出することが明らかとなっている<sup>18, 20)</sup>。

酸性雨が土壌に与える影響は短期間では、塩吸着と陽イオン交換反応で対応できる範囲である。しかし、有機物層の緩衝能は低く、森林土壌の表層土も置換容量が大きいにもかかわらず緩衝能が低い。森林土壌の表層部は生物活性に富んでおり、植物の根系も発達しているので、その酸性化が微生物の活性や植物の養分吸収に与える影響は大きいと考えられる。また、すでに酸性化の進んでいるポドゾルの溶脱層も緩衝能が低い。このような点より、土壌表層や高山・亜高山の土壌の変化を監視する必要がある<sup>4)</sup>。

現時点では広域の土壌の酸性化は確認されていないが、pHの低いスギ樹幹流により樹幹周囲の土壌のpHは極端に低下していることが確認された。また、火山灰を母材とする土壌は酸性化により溶出するアルミニウムの量が多いので、その影響も懸念される。

欧米の土壌に比較してわが国で酸性雨の被害が顕在化していない理由に土壌の緩衝能が高いことがあげられるが、土壌に与える影響は蓄積的であるので、土壌の酸性化は最も注意しておくべき事項である。

## 7. アルミニウムとスギの生育

水耕よりスギとヒノキのアルミニウムの毒性に対する抵抗性を調査した結果によると、スギは抵抗性が弱く、ヒノキは強いことが明らかとなっている<sup>31)</sup>。アルミニウムがスギの生育に与える影響を人工酸性雨を土壤に散布する方法で行った結果<sup>29)</sup>によると、pH2.1という極端に低い硫酸溶液を散布したところ、土壤のpHは3.7に低下し、土壤中の水溶性アルミニウム濃度は著しく上昇した。また、地上部に比較して地下部水の成長が著しく低下した。このことより、土壤中のアルミニウム濃度の上昇により、根の吸水阻害や養分吸収の阻害が起こる可能性が推測された。

しかしながら、衰退林、非衰退林において葉や根の塩基含有率やアルミニウム含有率を調査した結果<sup>32)</sup>では、これらの間には関係が認められていない。

酸性物質の負荷により土壤の塩基が流亡し、酸性化が進むとアルミニウムが溶出すること、スギ樹幹周囲の土壤がアルミニウムが溶出する程度まで酸性化している場合があること、さらに、アルミニウムの増加により吸水機能や養分吸収機能に阻害が生じることが確認された。これらの結果は、スギ衰退の特徴を説明する上で矛盾点はないが、衰退のメカニズムが確認されたわけではない。

## 8. 酸性雨とスギの衰退との関連

スギ衰退の原因あるいは衰退機構についてはいろいろと論議されているが十分に解明されていない。森川<sup>13)</sup>はスギの生育に関与する各種環境因子の変化と衰退の関係を考察して、都市化による生育環境の総合的な悪化により衰退が生じているとしている。また、横堀<sup>30)</sup>も茨城県下のスギ衰退と生育環境の調査より、生育環境の悪化が主要な原因だとしている。高橋<sup>25, 26)</sup>は広域的な衰退及び同一林地内において各個体の衰退状況を調査し、大気汚染や気象環境と関係があると推測している。

衰退現象の特徴と環境要因の特徴を要約すると以下のとおりである。衰退は平地に限られている。衰退は高樹齢の大径木で生じており、若齢木では見られない。孤立木、林分面積の小さい林分、同一林分では林縁木や突出木で衰退が著しい。幼齢木であるがpH4程度の人工酸性雨を散布しても被害は認められず<sup>28)</sup>、衰退地域に特に酸性の強い雨が降っているわけでもない。土壤の酸性化は、pHの低い樹幹流の影響がある樹幹

周囲を除けば確認されていない。樹幹周囲の土壤はアルミニウムが溶出するまで酸性化している場合があり、強度衰退木あるいは強度衰退地の方が酸性化が進行している傾向にある。都市化により気象環境は乾燥化しており、スギの生育には不利な状況になる傾向にある。オゾン等の大気汚染物質の分布とスギの衰退地域とは一致する。

これらの結果を総合的に判断すると、現在進行中のスギ林衰退を引き起こしている犯人は「酸性雨」単独であると速断するのは危険であろう。

早くから森林衰退が問題となっている北欧や北米においても衰退は人間活動により生じ、大気に排出された汚染物質が原因であろうとする点ではほぼ一致しているが、衰退の機構については研究者の間で意見が一致していない<sup>9, 17)</sup>。これは各々の国で自然環境や汚染の状況が異なることも理由の一つであろう<sup>37)</sup>。

以上のように、広域で衰退が確認されているスギ林でも衰退の原因確定とそのメカニズムの解明は十分ではない。しかしながら、都市化による環境の悪化、大気汚染地域と衰退の重なり、樹幹周囲の土壤の酸性化などが確認されており、人間活動が衰退に関与していることは否定できない。酸性雨の影響は慢性的・蓄積的であり、その影響が顕在化した場合には取り返しがつかない。スギ林等の森林衰退を環境悪化の警鐘と捉え、総合的な視点から研究を推進し、酸性雨の影響予測法を確立する必要がある。

## 9. おわりに

人間活動による地球環境の変動が世界的に論議されるようになり、温暖化、砂漠化、熱帯林の消失等とともに酸性雨も連日のように報道されている。森林衰退の情報も各地より報告されているが、わが国においては現時点では森林の衰退あるいは湖沼の酸性化は顕在化していないとされている。酸性雨の影響が最も危ぐされる森林生態系は複雑な系であり、生態系に対する影響は慢性的、蓄積的である。樹高20mから30m以上になる樹木の光合成や呼吸、あるいは水分生理等を測定することは容易なことではない。広く分布している根系の活力を調査するのに多大の労力が必要である。複雑な森林生態系を対象にして実験的手法により、現象を再現することも不可能に近い。しかし、被害が顕在化した時点では取り返しがつかない。森林で代表される水、空気、土壤等の環境資源の保全のために、酸性雨の影響予測法を確立することが今後の課題である。

う。基本的問題としては物質とエネルギーの流れが人間活動により攪乱される点にある。生存環境を維持するためには技術革新により省資源、省エネルギーをよりいっそう推進する必要がある。

#### 引用及び参考文献

- 1) 宝来俊一 (1988) : 鹿児島市周辺に降ったpH2.5の特異的酸性雨について, 全国公害研究会誌, 13(1)
- 2) 井上敏雄 (1990) : スギ林の衰退と酸性雨. 環境庁監修, 酸性雨土壌・植生への影響, 公害研究対策センター
- 3) 石塚和裕・堀田 庸 (1988) : 土壌カラムを用いた人工酸性雨試験によるスギ林土壌pHの変化と溶出成分. 99回日林論
- 4) 石塚和裕・高橋正通・高橋美代子 (1990) : 人工酸性雨による土壌pHの緩衝能. 101回日林論
- 5) 亀岡喜和子・三沢 彰・高橋啓二 (1989) : 関東地方におけるスギの衰退と土壌の酸性化. 造園学雑誌, 52-5
- 6) 環境庁・林野庁 (1986) : 関東地域におけるスギ林の衰退と酸性降下物の影響に関する緊急実態報告書. 昭和60年度
- 7) 同 (1988) : 同. 昭和61年度
- 8) 環境庁・日本土壌肥料学会 (1984) : 酸性雨の土壌への影響予察図
- 9) 北島 薫 (1988) : 中央ヨーロッパ森林衰退の現状と研究状況. 日生態誌, 38-3
- 10) 小山功 (1988) : 関東地方の酸性雨調査について. 全国公害研究会誌, 13(1)
- 11) 丸山 温・森川 靖・井上敏雄・田中信行 (1989) : 関東平野におけるスギ林の衰退. 昭和63年度研究成果選集, 森林総合研究所
- 12) 松浦陽次郎・堀田 庸・荒木 誠 (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 (印刷中)
- 13) 森川 靖 (1989) : 日本の森林衰退と酸性雨問題 - 関東地方のスギの衰退を例として -. 山林, 6月号
- 14) Morikawa, Y., Maruyama, Y., Tanaka, N., and Inoue, T. (1990) : Forest declines in Japan : mature Cryptomeria japonica declines in Kanto plains. IUFRO XIX World Congress, Division 2
- 15) 梨本 真 (1989) : スギ孤立木における樹幹流・樹冠雨の基礎特性. 100回日林論
- 16) 梨本 真・高橋啓二 (1990) : 関東甲信越・関西瀬戸内地方におけるスギの衰退現象. 森林立地, 32(2)
- 17) 野内 勇 (1990) : 酸性雨の農作物および森林木への影響. 大気汚染学会誌, 25(5)
- 18) 大羽 裕 (1990) : 酸性降下物が土壌の化学性及ばす影響と本邦土壌の酸中和能の評価. 「人間環境系」研究報告集, 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価とそれに基づく対策の検討, 文部省
- 19) 大原真由美外 (1988) : 中・四国地方の梅雨期の雨水性状について. 全国公害研究会誌, 13(1)
- 20) 大喜多敏一ほか11名 (1987) : 酸性雨. 気象研究ノート (酸性雨特集号), 158
- 21) 押尾敏夫 (1988) : 関東及び周辺地域における酸性雨, 全国公害研究会誌, 13(1)
- 22) 佐々朋幸・後藤和秋・長谷川浩一・池田重人 (1990) : 盛岡市周辺の代表的森林における雨水, 林内雨, 樹幹流の酸性度ならびにその溶存成分. 森林立地, 32-2
- 23) Sekiguchi, K., Hara, Y., and Ujii, A. (1986) : Dieback of Cryptomeria japonica and distribution of acid deposition and oxidant in Kantodistrict of Japan. Environmental Technology Letter, 7
- 24) 高橋啓二・沖津 進・植田洋匡 (1986) : 関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物の可能性. 森林立地, 28-1
- 25) 高橋啓二・沖津 進・植田洋匡 (1987) : 関東・甲信越地方におけるスギの衰退と大気二次汚染物質の分布. 98回日林論
- 26) 高橋啓二 (1990) : 酸性降下物と森林の被害. 環境庁監修, 酸性雨土壌・植生への影響, 公害研究対策センター
- 27) 玉置元則・小山功 (1991) : 地上から見た日本の酸性雨. 大気汚染 学会誌, 26(1)
- 28) 戸塚 績・三宅 博・伊豆田 猛 (1990) : 植物の成長に対する酸性雨の影響. 「人間環境系」研究報告集, 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価とそれに基づく対策の検討, 文部省
- 29) 戸塚 績・三宅 博・伊豆田 猛 (1990) : 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価 - 総合考察 -. 「人間環境系」研究報告集, 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価とそれに基づく対策の検討, 文部省
- 30) 戸塚 績 (1990) : 森林に対する酸性雨の影響. 現在化学, 235
- 31) 塘 隆男 (1962) : わが国主要造林樹種の栄養及び施肥に関する基礎的研究. 林試研報, 137
- 32) 堤 利夫 (1987) : 森林の物質循環. 東京大学出版会, 東京
- 33) 八木久義・佐々木恵彦・斯波義宏・丹下 健・相沢州平・石塚成宏 (1990) : スギに対する酸性雨の影響. 「人間環境系」研究報告集, 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価とそれに基づく対策の検討, 文部省
- 34) 山中芳夫 (1988) : わが国の酸性降下物質の降下量について. 全国公害研究会誌, 13(1)
- 35) 山家義人 (1978) : 都市域における環境悪化の指標としての樹木衰退と微生物相の変動. 林試研報, 301
- 36) 横堀 誠 (1981) : 茨城県内でのスギ樹勢衰退とその要因に関する研究. 茨城県林試研報, 13
- 37) 横堀 誠 (1989) : 酸性降下物等の森林に対する影響 - 中部欧州での森林枯損の実状とその原因. 森林と肥培, 142
- 38) 吉武 孝・増田久夫 (1986) : 苫小牧地域におけるストローブマツ等の異常落葉に関する考察. 林試研報, 337