

# スギ枯れはどこまで解明されたか —衰退分布と栽培試験から見てきたもの—

自然環境担当 小川 和雄

## 1. はじめに

関東地方平地部のスギ枯れ(梢端枯れ)が報告された1986年以降、相次ぐ樹木衰退事例の報道などによって、酸性雨が降っているというだけで、酸性雨が原因という認識が広まっていました。しかし、これまで行われてきた多くの人工酸性雨の暴露実験の結果は、現状程度の酸性雨ではスギに対する生長影響は認められないというものばかりでした。

一方、関東地方のスギは概ね、光化学オキシダント(Ox)の移流経路や、降水量の比較的少ない地域で衰退していると報告されていることから、乾燥による水ストレスか、あるいはオキシダント等二次生成物質<sup>注1)</sup>の影響ではないか、との説が提唱されていました。私達も1991年以降、埼玉県内全域や局地的な衰退分布を調査したり、水耕栽培、人工酸性雨の暴露試験等を行って、スギ苗は酸に強い植物であること、灌水量が少ないと著しく生長を抑制すること等を報告してきました。しかし、高濃度のオゾン(O<sub>3</sub>; Oxの大半がO<sub>3</sub>で、以下同義に扱う)が暴露されると光合成産物の根への配分に影響がある等の報告もあり、スギ衰退の主要因が降水量の減少や大気乾燥にあるのか、O<sub>3</sub>濃度にあるのか、あるいは両要因の複合影響なのか、の結論は未だ得られていませんでした。

この講演では、これまで私達が行ってきた人工気象室やオープントップチャンバー(OTC)<sup>注2)</sup>を用いたスギ苗栽培試験の結果や、野外でのスギ衰退分布実態を再評価することによって、明らかになった平地のスギ枯れの原因について報告します。

## 2. 人工気象室及びオープントップチャンバーによる栽培試験事例

2年生スギ苗400本を3月中旬に1万分の1アールポットに植え付け、生育の揃ったものを5月下旬に表1のとおり、人工気象室及びオープントップチャンバー(以下OTC)内に配置し、2年間栽培して、11月に採取し、根、幹、枝葉の部位別に乾物重を測定しました。

表1 試験区の概要と供試スギ苗数

年 度		2001年度			2002年度		
灌水量(mm)		1000	1500	2000	1000	1500	2000
オープントップ チャンバー (O <sub>3</sub> )	浄化区	12	12	12	6	6	6
	外気区	12	12	12	6	6	6
	2倍区	12	12	12	6	6	6
人工気象室 (湿度)	75%区	21	21	21	12	12	12
	63%区	21	21	21	12	12	12

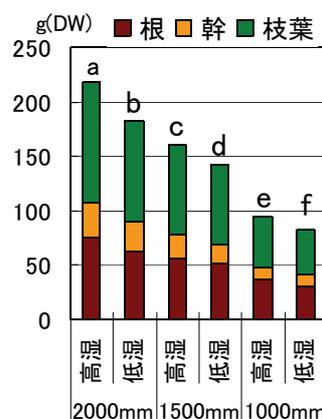


図1 スギ苗の乾物生長に及ぼす灌水量と湿度の影響

個体乾重の異なるアルファベット間には有意差(p<0.01)

### 2-1 人工気象室による灌水量と大気湿度の影響試験

日平均湿度を、概ね50年前の湿度75% (高湿)と現在の湿度63%(低湿)に設定した2機の人工気象室内(4m<sup>2</sup>)で、灌水量を2000、1500、1000mm相当/年に3区分してスギの生長を比較しました。1年目は5000分の1 aポットで栽培し、2年目は2500分の1 aポットに移植して試験した結果、

①スギ苗の伸長生長は灌水量が多いほど大きく、かつ大気中の湿度が高い方が良好でした。②個体乾重及び幹、枝葉、根、それぞれの乾物生長も伸長生長と同様、灌水量が多いほど、高湿度ほど良好でした(図1)。③光合成・蒸散速度については試験開始3か月後の2001年8月末の定期灌水直前に当年葉の最長枝を選び、各区5株を計測した結果では、地上部の乾物生長と同様、灌水量が多いほど有意に大きく、同一灌水量なら湿度が高いほど大きくなりました。蒸散速度は、各灌水量とも高湿区と低湿区の間に有意差がみられ、高湿の場合は灌水量2000mm、1500mmと1000mmとの間に有意差がみられました。

## 2-2 オープントップチャンバーによる灌水量とO<sub>3</sub>曝露の影響試験:

日中のO<sub>3</sub>濃度を外気の2倍、等倍、浄化区に設定した3連のOTC内(各3.2m<sup>2</sup>)で灌水量を2000、1500、1000mmに3区分して、人工気象室と同様、2年間スギの生長を比較しました。

O<sub>3</sub>濃度の月平均値推移は図2に示すとおりで、2年間の平均値は浄化区が7ppb、外気区が24ppb、

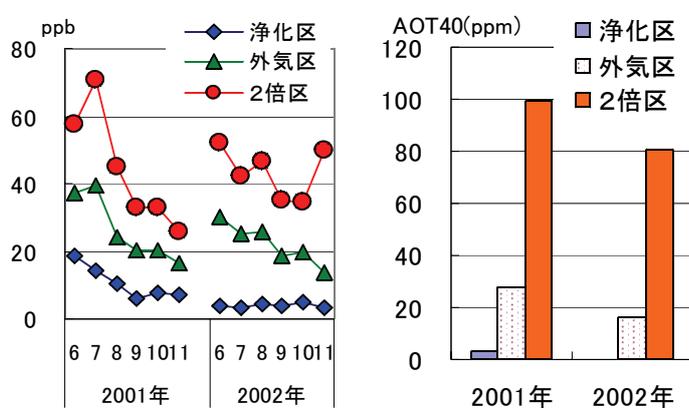


図2 OTC内のO<sub>3</sub>濃度(2001年6月~2002年11月)

図2 OTC内のO<sub>3</sub>濃度(2001年6月~2002年11月)

\* 2年目11月のOTC2倍区はO<sub>3</sub>制御がやや不調で、若干、高濃度となった

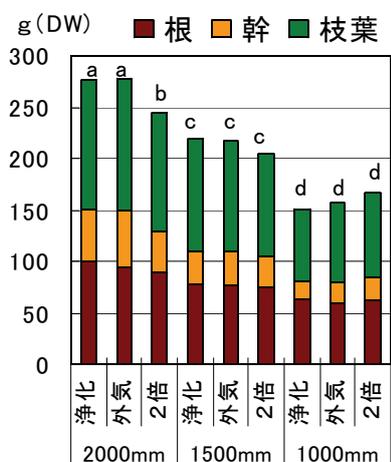


図3 スギ苗の乾物生長に及ぼすO<sub>3</sub>と灌水量の影響

\* 個体乾重の異なるアルファベット間には有意差あり (p>0.01)

2倍区が44ppbでした。AOT40<sup>注3)</sup>では6月から11月の2年間の平均値で浄化区が1.5ppm、外気区が22ppm、2倍区が90ppmでした。このようなO<sub>3</sub>濃度レベルでスギ苗を栽培した結果、

①スギ苗の伸長生長は初年度から灌水量が多いほど大きく、2年目に一層その傾向が拡大しました。②O<sub>3</sub>濃度の影響は、初年度は全くみられませんでした。2年目には灌水量2000mmの時、O<sub>3</sub>濃度2倍区でO<sub>3</sub>による伸長生長の抑制がみられました。③乾物生長も同様に、灌水量2000mm区-O<sub>3</sub>濃度2倍区でO<sub>3</sub>による個体乾重の生長抑制がみられました。灌水量1000mm区では2年間をとおしてO<sub>3</sub>の影響は全く見られませんでした(図3)。④2001年8月に各区5株を計測した光合成・蒸散速度は、灌水量1000mm区が1500mm区、2000mm区より有意に小さかった他は、O<sub>3</sub>濃度による差は各灌水量区とも、有意な差はみられませんでした。

## 3. スギ苗の生長に及ぼす灌水量、湿度、O<sub>3</sub>濃度の影響比較

2年間にわたり実施した灌水量と湿度、及び灌水量とO<sub>3</sub>濃度を組み合わせたスギ苗の栽培試験結果を基に、それらの生長影響の大きさについて比較、考察してみました。

図4、5に人工気象室試験で、スギの生長が最も良好であった高湿-灌水量2000mm区と、OTC試験で最も条件の良い、O<sub>3</sub>浄化-灌水量2000mm区の試験終了時の個体乾重をそれぞれ1として、

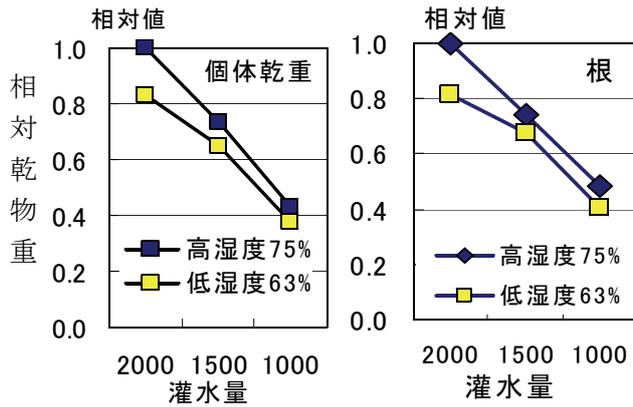


図4 灌水量2000mm/年－湿度75%区の乾物重を1.0とした時の相対乾物重の変化  
人工気象室：高湿度：75%，低湿度：63%

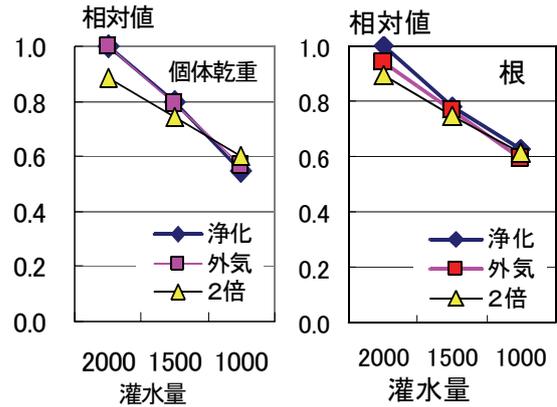


図5 灌水量2000mm/年－03浄化区の乾物重を1.0とした時の相対乾物重の変化  
OTC：2倍区は9時～18時の間、O<sub>3</sub>濃度が2倍

その他の各試験区の個体乾重及び根の乾物重を相対値で示しました。

灌水量の影響は極めて大きく、50年前の熊谷の平均湿度75%に設定した人工気象室では、灌水量2000mmに対し、1000mmでは0.43と個体乾重が著しく低下しました。近年の湿度レベルである63%では、灌水量2000mm、1000mmで乾物重はそれぞれ0.83、0.38となり、一層の生長低下がみられました。根への影響もほとんど同様でした。OTC試験でも同様に灌水量の影響は大きく、浄化区の灌水量2000mmに対し、灌水量1000mmで0.55に低下しました。O<sub>3</sub>濃度が野外条件である外気区でも同様の結果でした。これらの結果は、降水量や湿度低下でもたらされる乾燥による水ストレスの生長影響が著しく大きいことを明確に示しています。

一方、O<sub>3</sub>濃度の有意な生長影響がみられたのは、灌水量2000mmの時のO<sub>3</sub>濃度2倍区だけで、浄化区に対し、個体乾重が0.88、根の乾物重が0.90となる生長抑制がみられましたが、現状の汚染レベルである外気区では個体乾重の生長抑制はみられませんでした。灌水量1000mm区でO<sub>3</sub>濃度による乾物生長の差がみられなかったのは、著しい水ストレス状態が高濃度O<sub>3</sub>の影響を、現れにくくした結果と推察されます。

以上の結果から、スギ苗の生長に及ぼす影響の大きさは、灌水量≥湿度≥O<sub>3</sub>の順と考えられます。

#### 4. 野外の衰退分布等からみたスギの衰退要因

関東地方のスギ衰退の原因については現在、乾燥化による水ストレス説と、O<sub>x</sub>等二次生成物質＋小雨説とが有力ですが、いずれも野外での実証は困難なため、未だ、定説にはいたっていませんでした。そこで私たちは、衰退分布などの知見を再検討することで、衰退要因の解明を試みました。

野外のスギ衰退については、概ね以下の特徴が共通認識となっています。即ち、①衰退は主として大径木に多く、梢端から下方に枯れ下がる。②著しい衰退は平野部の都市及び周辺地域に多く分布している。③特に、関東地方では、概ねO<sub>x</sub>（大半がO<sub>3</sub>）の移流経路や降水量が比較的少ない(1500mm以下)地域で顕著である。④局地的な衰退の大きさは、孤立木≥突出木・林縁木>林内木の順で、規模の小さいスギ林や道路際での衰退が目立つ傾向があると指摘されています。

これらのスギ衰退の特徴は、病虫害の影響等を除外したものである以上、何らかの環境条件の影響を受けた結果と考えられます。したがって、栽培実験の結果と矛盾せず、①衰退の開始時期や、②広域的な衰退分布、③局地的な衰退分布、④衰退の症状そのもののいずれに対しても、整合性のある環

境条件が、スギ衰退の主要因と考えることが妥当ということになります。

#### 4-1 衰退の開始時期

梢端枯れが問題になるほどに広域に広まったのは、空中写真で明らかですが、概ね1970年以降です。スギはもともと、老齢化して梢端部分が丸みを帯びたり、葉量が減少する傾向があるのですが、それが環境変化によって、急激に、激しく進行したものと考えられます。

一方、環境要因としては、高度成長にともなう都市化の進行、1950年代からの気温上昇と湿度の急激な低下、1950年代半ばから80年代後半にかけての降水量の減少等の変化がみられます。大気汚染では、1960年代にSO<sub>2</sub>が高濃度となり1970年代半ばまで続き、この間、臨海工業地帯周辺でスギ、マツが枯れたことはよく知られています。その後はNO<sub>2</sub>が高濃度となり、近年まで横ばい状態が続いています。降水のpHが低下し始めたのは1960年代後半からです。O<sub>x</sub>は70年代から現在まで、少なくとも感受性の高い植物に被害を与え続けるレベルで推移し、近年は上昇傾向にあります。現在も進行しているスギ衰退に対し、このような環境の時系列的変動で整合性のありそうなのは、気温上昇と湿度の低下、降水量の減少、O<sub>x</sub>及び酸性雨です。

#### 4-2 広域・局地の衰退分布

関東平野のスギ枯れ分布はO<sub>x</sub>の移流経路に当たる地域が中心とされていますが、詳細にみると、都市近郊の田園地帯のO<sub>3</sub>濃度は都心部に比べて高く、例えば、光化学オキシダント注意報が頻繁に発令される埼玉県西部地域では、アサガオ、サトイモ等の可視被害が多発しており、屋敷林や寺社林として植栽されているスギの衰退は著しいものがあります。しかし、すぐそばに隣接する林業用造林地の、高密度で樹高の揃ったスギ林に梢端枯れは全く見当たりません。このことは、他の地域でも同様であり、例外というよりは普遍的現象です。また、埼玉ほどO<sub>3</sub>が高濃度ではない地方都市でもスギの衰退は数多くみられます。これらのことは、O<sub>3</sub>濃度分布とスギ衰退分布との間に、著しく整合性がかかる部分があることを示しています。

また、スギの衰退の局地的分布に、孤立木 $\geq$ 林冠<sup>注4)</sup> 突出木・林縁木 $>$ 林内木 のような明らかな差があることも、O<sub>3</sub>濃度分布とは整合性を欠く現象です。O<sub>3</sub>やその他の二次生成物質は広域を移流してくるものであり、どこに分布するスギであれ、少なくとも梢端の大半は等しく曝露されているものと考えられます。スギ林の内側であっても外部とのO<sub>3</sub>濃度差は概ね数ppb程度であり、局地的な衰退分布の著しい差をもたらす原因になるとは考えられません。さらに道路際で梢端枯れが目立つ傾向は、オゾン濃度分布とは全く逆の現象です。交通量の多い道路際ほど、O<sub>3</sub>濃度は後背地に比べて低いことが明らかだからです。沿道では、自動車排ガス中のNOがO<sub>3</sub>と反応してNO<sub>2</sub>に変化し、O<sub>3</sub>が消滅してしまうためです。

以上のように、スギの局地的衰退分布はO<sub>3</sub>濃度分布との整合性は極めて低いのですが、一方、スギの水ストレス状態を想定すると、整合性のある理解が可能と考えられます。即ち、大面積の人工造林地が衰退せず、孤立木や突出木の衰退が著しいことは、湿度分布と一致しています。大面積で林冠のそろった樹林地は高い湿度に保たれていることが知られています。例えば、埼玉県新座市の平林寺スギ林内では、8月日中(9時~16時)の平均湿度は87%、同一敷地内の裸地は76%と、11%もの差がみられま

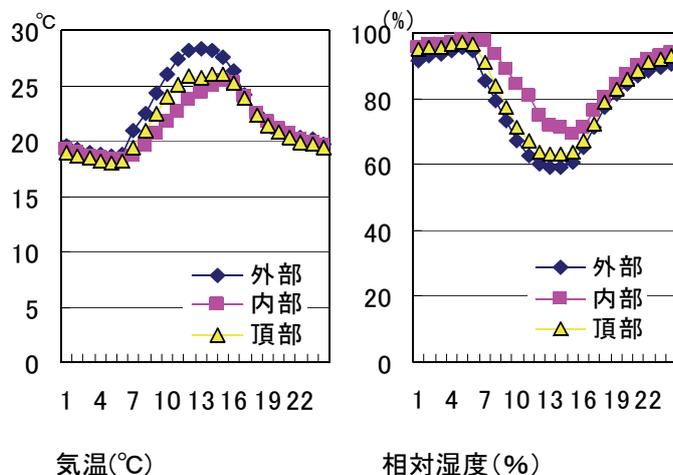


図6 雑木林内外の気温、湿度時刻変動(8月~10月)

す。また、埼玉県環境科学国際センター生態園内の小群落では8月から3か月間の平均値(図6)で、日中(9時~16時)の林内が77%で、敷地内の裸地が63%でした。時刻別では、光合成の活発な午前11時には林内外で最大18%もの差がみられています。また、林冠頂部の2m上(h=12m)で測定した湿度は、日中67%で、林内より10%も低い結果でした。

以上のように、局地的なスギ衰退分布は湿度分布とは良く一致し、降水量やオゾン、酸性雨、その他の二次生成物質との整合性は低いといえます。ただし、スギ衰退の目立つ関東地方では、勝浦等の一部地域を除いて、降水量が1500mm以下と少なく、もともとスギの多くが水ストレスを受けやすい状態に置かれていると考えられます。

#### 4-3 スギの衰退症状

スギの衰退は、大径木、高齢木に多く、梢端から枯れ下がる現象が特徴ですが、少なくとも樹齢20年や30年のスギに、そのような現象はみられません。O<sub>3</sub>等有害物質の直接曝露によって衰退することを想定した場合、スギ衰退が1970年前後に広がった、ということは10年から20年の曝露で症状が発現したと考えられ、振り返れば、現在、盛んに光合成を行っている樹齢30年程度の若いスギに症状が発現していないことは時系列的に整合性がありません。酸性雨や他の二次生成物質についても同様です。樹高の高い高齢木で著しく衰退し、且つ梢端から枯れ下がることは、O<sub>3</sub>による直接障害という視点では説明が困難なものと考えられます。

一方、乾燥による水ストレスを想定した場合、梢端、あるいは樹木全体が直射日光や乾燥した風に長期間、直接、暴露されることで、気孔閉鎖が生じやすくなることは明らかです。蒸散速度が低下し、スギの土壌水分の吸い上げが悪化して、高所にある梢端付近の枝葉の乾燥が進み、葉量の減少や枯れ下がりが生じるものと推察されます。小川らが測定したスギ衰退木の葉の水分含有率(h=12m)は、当年葉、前年葉とも、梢に近い上部ほど水分含有率が低く、長期にわたる水ストレスの結果を反映していたものと考えられます。即ち、梢端枯れの症状は、湿度や土壌水分条件等によってもたらされる水ストレスとの整合性が極めて高いものと考えられます。

#### 4-4 土壌物理性

スギ衰退に土壌物理性の影響の大きいことは古くから指摘されています。近年、松本ら(2002)は、1999年から2001年の関東地方の樹木衰退状況の報告の中で、湿度の低い水戸や宇都宮でも衰退が進行していることから、「空気が乾燥する土地で土壌の保水能力の低い土地ほどスギが衰退している」と、適切なまとめを行い、土壌の物理性による土壌水分条件等の影響の大きさについて、改めて指摘しています。踏圧の影響を受けない林冠木が衰退しにくく、参道や道路際の衰退が著しい傾向にあることは明らかに認められます。ただし、林内の突出木が著しく衰退する傾向については、土壌物理性との整合性はありません。したがって、土壌物理性は、根圏形成や水の供給側から水ストレス状態を左右する条件、と考えられます。突出木の衰退は、低湿度を主要因とし、直射日光や風、土壌水分条件等によりもたらされた水ストレスの影響と考えることが自然です。

### 5. 結論と課題

人工気象室、OTCによる曝露試験の結果、スギ苗の生長に及ぼす影響は、灌水量が最も大きく、次いで湿度であり、現状レベルのオゾン濃度の影響はわずかでした。したがって、野外においても降水量の生長影響は極めて大きいことは明らかです。

関東地方について、広域、局地的スギ衰退分布を検討した結果でも、O<sub>3</sub>濃度分布との整合性は高いことから、O<sub>3</sub>がスギ衰退の主要因とは考えにくいことが分かりました。

結局、関東地方の局地的な衰退分布と最も整合性が高かったのは湿度です。降水量が比較的少ない地域では、スギは長期間水ストレス状態におかれ、大気の乾燥が加わることで、生長抑制から、梢端

表2 関東地方におけるスギ衰退分布と現実的環境因子との適合性

環境因子	曝露試験	広域分布	局地分布 孤立木≧突出木≧林内木	沿道衰退	衰退の特徴 (大径木梢端枯れ)
オゾン	△	○*1	×	×	× (毒性影響)
酸性雨・酸性降下物	×	△	×	△	× (毒性影響)
大気湿度	○	○	◎	△	○ (水ストレス)
降水量	◎	○	×	×	○ (水ストレス)
土壌物理性	—	△	△ (突出木は不整合)	○	○ (水ストレス)

備考) ◎極めて適合 ○概ね適合 △一部適合 ×不適合

\*1: 林業用の人工林を除いた適合性

枯れへの「不可逆的な影響」がもたらされたものと考えられます。水ストレスは水の消費と供給のバランスの結果であり、供給側である降水量や土壌物理性など、地域によって異なる条件が水ストレスを助長、あるいは軽減しているものと考えら

れます。

このような大気の乾燥化や、高濃度O<sub>3</sub>をもたらしている都市のヒートアイランド現象や地球規模の気候変動は現実に行進しており、スギ枯れは今後も進行していくことが予想されます。また、水要求性の大きい他の樹木への影響も危惧されます。

今後の課題としては、大気の乾燥や降水量、土壌物理性等の組み合わせでもたらされる水ストレスで、全国のスギ衰退実態の説明が可能か、について検証することです。

なお、本稿の作成に当たっては、日本環境学会誌「人間と環境」(2007)、及び第23回気象環境研究会「大気環境変化と植物の応答」(2007)に掲載された論文を、改変、利用しています。

## 用語解説

注1) 二次生成物質：発生源から排出された一次汚染物質が大気中で反応して二次的に生成する汚染物質のことで、光化学オキシダントや酸性雨、エアロゾルなどがあります。

注2) オープントップチャンバー (OTC)：天井部分の開いたチャンバーのことで、活性炭で浄化した空気や外気を送り込んで植物を栽培し、生長を比較する装置。

注3) AOT40：植物の成長期における昼間O<sub>3</sub>濃度（1時間値）の40ppb以上の期間積算値。

注4) 林冠：森林上部の枝と葉の集中した層のこと。

## 文献

河野吉久・松村秀幸・小林卓也(1994)樹木の可視害発現におよぼす人工酸性雨の影響, 大気汚染学会誌, 29, 206-219.  
松本陽介・丸山温・森川靖(1992a)スギの水分生理特性と関東地方における近年の気象変動—樹木の衰退減少に関連して—, 森林立地, 34(1), 2-13.

松本陽介(2002)人工林生態系の脆弱性評価, 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究(平成11~13年度), 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書, 101-119.

三輪誠・伊豆田猛・戸塚績(1993)スギ苗の生長に対する人工酸性雨とオゾンの単独及び複合影響, 大気汚染学会誌, 28, 279-287.

梨本真・河野吉久(1989)スギ衰退とオキシダント, 降雨量の分布に関する一考察, 電力中央研究所研究報告, U89017.

小川和雄・松本利恵・高野利一(1992)埼玉県平地部におけるスギの衰退とその要因, 人間と環境, 18(2), 61-69.

小川和雄(1996)スギ苗の生長に及ぼす灌水量の影響, 人間と環境, 22(2), 92-98.

小川和雄(1999)埼玉県におけるスギ平地林の衰退要因, 全国公害研会誌, 24(1), 2-10.

小川和雄(2007)スギ苗の生長に及ぼすオゾンと水ストレスの影響, 人間と環境, 33(2), 60-68

小川和雄(2007)平地のスギ枯損の原因はわかったのか, 第23回気象環境研究会「大気環境変化と植物の応答」13-20

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による可性, 森林立地, 28, 11-17.