

日本の森林衰退とオゾンとの関係

目次

1
2
3
4
5 1. はじめに 2
6 2. 丹沢山地のブナ 3
7 3. 立山黒部アルペンルート of ブナ 3
8 4. 関東平野のスギ 5
9 5. 屋久島のヤクタネゴヨウ 6
10 6. 摩周湖外輪山のダケカンバ 6
11 7. 奥日光のダケカンバ、オオシラビソ及びコメツガ 7
12 8. 宝満山のモミ 7
13 9. 奥秩父亜高山帯のシラビソ 8
14 10. まとめ 8
15 11. 参考文献 8
16
17

18 1. はじめに

19 一般に森林衰退とは「何らかの原因によって森林を構成している樹木の衰退が進行
20 している過程と、その結果として多数の樹木が枯死し、森林としての構造や機能が保
21 持できない状態」と定義できる(伊豆田 2001)。現在までに様々な森林衰退が日本各地
22 において観察されてきた。本資料では、その中でオゾンに関連した調査が行われた国
23 内の森林衰退事例を紹介する。

24 オゾンとの関連が考えられている本資料で紹介する森林衰退事例について、調査場
25 所や樹種、オゾンに関する調査状況などを表 1 にまとめた。また、森林衰退には様々
26 な原因が複雑に関連しあうと思われ、オゾン濃度やオゾン吸収量が高いことだけで、
27 森林衰退にオゾンが関与していると結論付けることはできないため、表 1 には、想定
28 されるオゾン以外の衰退原因も示した。

29

30 表 1 オゾンとの関連が考えられている国内の森林衰退事例の
31 オゾンに関する調査状況と想定されるオゾン以外の衰退原因

場所	樹種 (学名)	オゾン濃度	オゾン曝露実験		想定されるオゾン以外の衰退原因
			現地	他所	
丹沢山地	ブナ (<i>Fagus crenata</i>)	○	○	○	乾燥ストレス、ブナハバチの食害、シカの食害
立山黒部 アルペンルート	ブナ (<i>Fagus crenata</i>)	○			
関東平野	スギ (<i>Cryptomeria japonica</i>)	○		○	SO ₂ 、土壌酸性化、エピクチクラワックスの劣化や浸食、粒子状物質、土壌の締固め、乾燥ストレス
屋久島	ヤクタネゴヨウ (<i>Pinus amamiana</i>)	○			SO ₄ ²⁻ 沈着
摩周湖外輪山	ダケカンバ (<i>Betula ermanii</i>)	○	○		乾燥ストレス
奥日光	ダケカンバ (<i>Betula ermanii</i>) オオシラビソ (<i>Abies mariesii</i>) コメツガ (<i>Tsuga diversifolia</i>)	○			ヒドロキシラジカル、有機過酸化物、乾燥ストレス
宝満山	モミ (<i>Abies firma</i>)	○			
奥秩父亜高山帯	シラビソ (<i>Abies veitchii</i>)	○			乾燥ストレス

32

33

34 2. 丹沢山地のブナ

35 丹沢山地は関東地方の南西に位置し、ブナ林は同山地の 800 m から上部に分布して
36 いる。ブナ (*Fagus crenata*) の枯死は 1970~1980 年頃にまとまって発生しており(越
37 路ら, 2012)、2000 年代以降も衰退が継続している(神奈川県自然環境保全センター,
38 2017)。高標高域、特に蛭ヶ岳から丹沢山・竜ヶ馬場にかけての主稜線と檜洞丸の南~
39 西向き斜面を中心にブナ林の衰退が進行している。このようなブナの衰退状態やその
40 原因などを調べることを目的とした現地調査(戸塚ら, 1997a, b, c; 丸田ら 1999)より、
41 檜洞丸山頂付近の南斜面におけるブナの衰退木は、北斜面の健全木に比べて、葉の光
42 合成速度、水利用効率(純光合成速度/蒸散速度)、クロロフィル含量などが低いこと
43 が明らかになった。一方で、夜間の蒸散速度や気孔コンダクタンスは衰退木において
44 高かった。南斜面の方が大気が乾燥気味であったことも合わせて考えると、衰退木で
45 は、健全木に比べて水分ストレスを受けやすいと考えられた(伊豆田, 2001)。ブナの衰
46 退原因を探るために、両斜面における環境要因の測定を行った。両斜面の土壌を分析
47 した結果、いずれも土壌 pH が 5.4 以上であったため、酸性降下物によって土壌が酸
48 性化しているとは言えない状態であった。また、両斜面とも大気中の二酸化硫黄(SO₂)
49 や二酸化窒素(NO₂)の濃度は低かった。一方で、南斜面の方がオゾン濃度が高く、
50 ブナに対して悪影響をおよぼしている可能性が指摘された。実際に、犬越路において
51 実施されたブナ苗によるオープントップチャンバー実験によって、現地のオゾンが葉
52 の生理機能や成長量を低下させ、葉の老化と早期落葉を引き起こすことが報告されて
53 いる(武田と相原, 2007)。Suto *et al.* (2008)は、丹沢山地の大気に関する物質移流の
54 モデルシミュレーションによって、オゾン濃度と風速の積であらわされるオゾン移流
55 フラックスが高い地点とブナの衰退地点が良く対応していることを報告した。また、
56 斎藤(2013)は丹沢山地を含む周辺地域のオゾン吸収量を数値モデルで推定し、オゾン
57 吸収量が丹沢山地の全域で樹木に悪影響を及ぼし得るレベルであり、特に標高の高い
58 地点ではオゾン吸収量が多いことを指摘した。以上より、丹沢山地におけるブナ林の
59 衰退にオゾンが関与している可能性が指摘されている。

60 この他にも気温上昇や樹木の枯死や倒木によって形成される局所的なギャップ(葉
61 のない空間)の拡大に伴う慢性的な土壌の乾燥ストレス、ブナハバチの大量発生によ
62 る食害、シカの生息数の増加に伴う稚樹の食害や林床植生の衰退などが指摘されてお
63 り、丹沢山地のブナ林の減少に影響を与える要因は複雑であると考えられている
64 (Kohno, 2017; 神奈川県自然環境保全センター, 2017)。

65

66 3. 立山黒部アルペンルートのブナ

67 立山黒部アルペンルートは富山県と長野県を結ぶ山岳観光ルートで、毎年4月から
68 11月までに約100万人の観光客が通過する。美女平(標高977 m)から室堂(標高

69 2,450 m) までは主に大型バスによって観光客の輸送がなされるが、道路沿いのブナ
70 林で樹木の枯死が目立つことから、排気ガスの悪影響が指摘されてきた。一方、日本
71 海に面しているため、大陸からのオゾンや SO₄²⁻などの広域大気汚染の影響も懸念さ
72 れていた。そこで、ブナ平(標高 1180 m)のブナ・スギ(*Cryptomeria japonica*)混
73 交林において、バス通行量、大気汚染物質(NO₂とオゾン)及び森林動態の関係につ
74 いての調査が行われた(Kume *et al.*, 2009)。平均 NO₂濃度は、バス通行量と高い相関
75 を示し、また、道路際で最も高く、道路からの距離とも相関した。しかし、平均 NO₂
76 濃度は極めて低く 3.5 ppb 以下であり道路由来の大気汚染が森林に直接的な影響を与
77 えている可能性は低いと考えられた。一方、オゾン濃度は、道路からの距離にかかわ
78 らず高い値を示し、平均濃度が 60 ppb を超えることもあった。調査した 1999 年から
79 2006 年の 7 年の間に認められた樹木枯死の大半はブナであり、大木ほど幹の肥大成
80 長が抑制される傾向が見られた。その一方で、スギは大木ほど肥大成長が増大してい
81 た。オゾン曝露実験よりブナはオゾン感受性が高く、スギはオゾン感受性が低いこと
82 が知られていることから、現地のオゾン濃度はオゾン感受性の高いブナの衰退を引き
83 起こすほどに上昇しており、ブナ衰退で生じたギャップにおいてオゾン感受性の低い
84 スギの成長が促進されたと考えられた。

85 Kume *et al.* (2009)の大気汚染物質の調査が実施された 2006 年以降、中国では大気
86 汚染対策が取られるようになり、日本の酸性沈着量も減少しはじめた。そこで、この
87 ような大気環境の変化が、立山のブナやスギの成長にどのような影響を及ぼしている
88 のかに関する検証が実施された(Kume *et al.*, 2020)。富山県の「立山植生モニタリン
89 グ調査」事業では、長期環境変動の影響を評価するために 1998 年より標高別の各森
90 林帯 10 サイトで数年おきに毎木調査を行い、樹木の成長や枯死が記録されている。
91 ブナ平(ブナ・スギ混成林・標高 1,190 m)、ブナ坂(スギ・ブナ混成林・標高 1,110 m)
92 の記録を解析した結果、いずれの林分においてもブナの幹直径増加速度は 2008 年以
93 前と比較して増加していた。一方、同じ林分に生育しているスギではそのような傾向
94 は見られず、幹直径増加速度は横ばい、もしくは減少傾向にあった。中国における大
95 気汚染物質の排出削減とラニーニャ的な気候条件¹の影響によって、大陸から輸送され
96 る大気汚染物質が減少し、オゾン感受性の高いブナと感受性の低いスギの種間関係が
97 変化し、ブナの競争力が高まる要因となっていた可能性が考えられた。従来の研究で
98 は単一の種に対するオゾンの影響が調査・議論されてきたが、複数の種が混在する場
99 合、大気汚染と気候変動によって、森林全体の衰退が生じなくとも植生が変化する可

¹ ラニーニャ的な気候条件：日本の南側の太平洋上の気圧が平年よりも低い状態、日本
の東側のアリューシャン列島付近の気圧が平年よりも高い状態になり、日本周辺
の西風(大陸から日本へ向かう風)が弱まった気候条件。

100 能性があることを示す結果といえる。

101

102 4. 関東平野のスギ

103 関東平野においてはスギの衰退が報告されている。亀岡ら(1991)はスギの年輪解析
104 より、1960年初頭からスギの成長低下が起こっており、1970年代後半から回復が見
105 られたことを報告している。これらの幹の肥大成長の推移と大気SO₂濃度の間に相関
106 が認められたことから、1960~1970年代においてはSO₂がスギの衰退に関与してい
107 たことが示唆されている。一方で、1980年代以降、スギの成長が再び低下していた。
108 この衰退を説明する仮説として、酸性降下物の沈着とそれに伴う土壌酸性化(梨本ら、
109 1993)、光化学オキシダント(高橋と梨本, 1993)、エピクチクラワックス(葉の表面に
110 滲出したワックスであり、水の発散の抑制や紫外線による障害を防ぐ役割を持つ)の
111 劣化や浸食(Sase *et al.*, 1998a; Sase *et al.*, 1998b)、粒子状物質による気孔の目詰ま
112 り(Takamatsu *et al.*, 2001)、土壌の締固め(伊藤ら, 2002)の影響が考えられた。梨本
113 と河野(1989)はオキシダント濃度が高くかつ降水量の少ない地域において、スギの衰
114 退が認められることを示した。一方、平野ら(1995)はスギの2品種のクローン苗の針
115 葉におけるガス交換速度に対する、オゾン、NO₂及びSO₂の短期曝露実験(0.1もし
116 くは0.2 ppm×3時間)を実施した。その結果、オゾン単独曝露では針葉の純光合成
117 速度に影響はなかったが、他の大気汚染物質と複合的に曝露されると、オゾン感受性
118 が高かった品種において純光合成速度や気孔コンダクタンスの低下が認められたこと
119 を報告している。松本ら(1992a, b)は、スギは日本の主要な樹種と比較して水ストレ
120 スに弱いこと、観測されているオゾン濃度(1980年代)は以前(1970年代)に比べ
121 て低下していることから、乾燥化がスギの衰退の主要因であると推論している。
122 Sakata(1996)も、スギ針葉の元素組成と炭素安定同位体比の解析より、スギ林の衰退
123 が乾燥に伴う水ストレスによって引き起こされたものである可能性を支持している。
124 さらに、都市化に伴い、スギの大径木が孤立したり、根元近くまで舗装が行われるな
125 ど、スギの生育環境の悪化も指摘されている(松本ら, 2002)。一方で、松本ら(1992b)
126 のオゾン曝露実験ではオゾンによる気孔調整機能の低下(気孔が開いてしまう)が認
127 められていることから、1980年代に比べてオゾン濃度が高くなった現在では、オゾン
128 がスギの気孔調整機能を低下させ、乾燥に伴う水分ストレスへの耐性を低下させてい
129 る可能性も考えられるが調査は行われていない。以上より、スギ林の衰退のメカニズ
130 ムは明らかになっていないものの、Takahashi *et al.* (2020)においても述べられてい
131 るように、都市化や気候変動そして大気汚染といった要因が複合的に関与して、樹木
132 の健全性の低下や枯死につながったと考えられる。

133

134

135 5. 屋久島のヤクタネゴヨウ

136 屋久島では絶滅危惧種のヤクタネゴヨウ (*Pinus amamiana*) の衰退が 1990 年に報
137 告されている(Nagafuchi *et al.*, 1995)。ヤクタネゴヨウの衰退を説明する仮説の一つ
138 は中国から越境大気汚染として運ばれてくる高濃度のオゾンと SO_4^{2-} の沈着である
139 (Kume *et al.*, 2010)。屋久島の北西部の特に尾根部に生息するヤクタネゴヨウの針葉
140 には冬季に多量の非海塩性 SO_4^{2-} が沈着していた。針葉からカリウム溶脱速度が増加
141 しており、葉面積あたりの乾重量も低下していた。また、針葉の生理的障害の指標と
142 なるエチレン放出速度も高まっていた。 SO_4^{2-} の沈着に伴う針葉からのカリウム溶脱は
143 新潟県のスギ林においても確認されている(Sase *et al.*, 2008)。ヤクタネゴヨウのオゾ
144 ン感受性は明らかになっていないため、どの程度の影響が引き起こされているのかは
145 不明であるが、現地においては北西からの風が卓越した際に大気オゾン濃度が顕著に
146 高くなり、100 ppb を超えるような高濃度も観測されていることから、オゾンがヤク
147 タネゴヨウの生育に悪影響を引き起こしている可能性も指摘されている。越境大気汚
148 染に関しては、高濃度のオゾンが観測されたときの後方流跡線解析(久米ら, 2011)や、
149 生態系構成要素の元素構成や Sr や Nd の同位体比の調査(Nakano *et al.*, 2012)によっ
150 て支持されている。

151

152 6. 摩周湖外輪山のダケカンバ

153 北海道の摩周湖外輪山においてダケカンバ (*Betula ermanii*) の衰退が観測されて
154 いる。佐久間ら(2013)は、現地における土壌・植生調査から、土壌の窒素や可給態リ
155 ン酸含有量は、一般的な火山灰地と比べて半分以下であり、極めて貧栄養であること
156 を報告している。さらに、衰退木の多い場所では有効土壌深(表層から軽石層上端ま
157 での深さ)が、健全木の多い場所の半分程度であり、土壌の養分及び水分保持能力が
158 ダケカンバの衰退に関与している可能性が指摘されている。実際に、その後に行われ
159 たダケカンバ葉の水分特性調査より、現地のダケカンバは乾燥に対して脆弱な水分特
160 性を有しており、さらに衰退木の葉の水ポテンシャルは健全木よりも有意に低かった
161 ことが明らかになっている(佐久間ら, 2014)。一方で、大気汚染物質に関する調査も実
162 施されてきた。現地におけるオゾン濃度は、夏は比較的低濃度であるものの、春は月
163 平均で 50~60 ppb と比較的高濃度であった(Yamaguchi *et al.*, 2017)。現地において
164 ダケカンバとシラカンバの苗木を用いたオープントップチャンバー実験を実施した結
165 果、オゾンが葉の光合成能力を低下させ、根へのバイオマスの配分を低下させている
166 可能性が示唆された(Hoshika *et al.*, 2013)。一方、現地で頻繁に観測される霧の酸性
167 度は深刻ではなかった。また、植物の成長期における霧の沈着からの窒素負荷量は、
168 30 meq m^{-2} と推計され、霧がダケカンバの主な窒素源の一つとして、生育に影響を与
169 えていることが示唆された(Yamaguchi *et al.*, 2017)。

170 以上より、摩周湖外輪山のダケカンバ衰退は特に水分に関して脆弱な土壌環境であ
171 ることが主な要因であるものの、オゾンや酸性霧といった人為起源の大気汚染もダケ
172 カンバの生育に影響を及ぼしてきた可能性がある。

173

174 7. 奥日光のダケカンバ、オオシラビソ及びコマツガ

175 栃木県の奥日光ではダケカンバ、シラビソ (*Abies veitchii*)、オオシラビソ (*Abies*
176 *mariesii*) 及びコマツガ (*Tsuga diversifolia*) などの衰退が、亜高山帯の極相林におい
177 て 1980 年代から観察されている(谷本ら, 1996)。この衰退については更新木の苗木が
178 生育していることから、亜高山帯における自然な樹木枯死であるとの指摘もあるが(谷
179 本ら, 1996)、現地では首都圏からの移流に由来する 100 ppb を超える高濃度のオゾン
180 や(畠山と村野, 1996)、オゾンに起因するヒドロキシルラジカル及び有機過酸化物が
181 観測されており(畠山, 1999)、その森林への影響の可能性も指摘されている。一方で首
182 都圏からの大気汚染物質の流入とその沈着に伴う土壌酸性化が森林衰退に寄与してい
183 る可能性も指摘されたが、現地における土壌の pH や養分利用性及び樹木葉の養分濃
184 度の調査からは、それを裏付ける結果は認められなかった(田村ら, 2002; 谷川ら,
185 2009)。しかしながら、谷川ら(2009)は他の亜高山地域に比べて奥日光のコマツガの針
186 葉と土壌は Mg 含量及び Mg/Ca モル比が低いことを報告しており、土壌の低 Mg とい
187 う立地特性がダケカンバなどの他の樹種も含めて、生理的ストレスに対する感受性を
188 高めている可能性を指摘している。また、前白根山においてはダケカンバの衰退が主
189 にみられる南東斜面において、夏季の土壌含水率とダケカンバの葉の水ポテンシャル
190 が、非衰退地のそれらに比べて有意に低かったことから、夏季の乾燥が衰退地に生育
191 するダケカンバの成長低下などに関与している可能性が指摘されている(伊豆田と小
192 川, 2004; 伊豆田, 2006)。

193

194 8. 宝満山のモミ

195 福岡県の宝満山ではモミ (*Abies firma*) の衰退が観測されており、1990 年に須田ら
196 (1992)が調査を行っている。衰退が著しいモミの個体数は全体の 28%に達しており、
197 特に山頂付近で著しかったが調査地点によって枯損の程度に違いがあった。特に大径
198 木のモミにおいて衰退が著しい傾向にあった。林内における雨や霧の pH や土壌の酸
199 性度の調査の結果、両者ともある程度の低い pH が認められたが、調査地点間での違
200 いはなく、地点間のモミの衰退程度の差異を説明することはできなかった。一方、宝
201 満山におけるオゾン濃度の観測より、100 ppb を超える高濃度のオゾンは観測されて
202 いないが、三郡山の山頂にある観測局で 1987 年 5 月から 9 月の期間で 1 時間値が 60
203 ppb を超えた合計時間数は 661 時間であり、オゾンがモミに対してストレスとして働
204 いている可能性を否定できなかった。

205

206 9. 奥秩父亜高山帯のシラビソ

207 東京都、埼玉県、山梨県及び長野県の境界部に位置する奥秩父山地において、シラ
208 ビソの枯死が観察されており、現地において立ち枯れの実態、降水の性状、土壌の pH、
209 気象条件及びオゾン濃度に関しての調査が行われた(伊豆田と小川, 2004)。シラビソ
210 の立ち枯れは尾根直下の土壌の保水力が乏しい地域に断続的に発生していた。降水の
211 汚染や土壌酸性化は認められず、オゾン濃度は平地部に比べて平均値としては高いが
212 (日中 12 時間平均値の最高値は 71.2 ppb)、日中 (15 時頃) のピーク濃度は平地部
213 よりも低かった (一時間値の最高値は 92.2 ppb)。これらの調査結果より、長期的な
214 オゾンの影響に関しては今後の検討課題ではあるものの、都市部からの汚染物質の移
215 流がシラビソの立ち枯れを引き起こしている可能性は低いと考えられ、立ち枯れは天
216 然更新の一形態とされる縞枯れ現象であると結論づけられた。

217

218 10. まとめ

219 本資料では、オゾンに関連した調査が行われた森林衰退の事例を紹介した。今回紹
220 介した調査地の多くでは、比較的高い濃度のオゾンが観測されており、森林衰退への
221 オゾンの関与の可能性も指摘されている。また、Watanabe *et al.* (2016)によると、北
222 関東の森林においても丹沢山地と同等のオゾン吸収量であることが予測された。この
223 ことは、これまでにオゾン被害が報告されていない森林地域においても、オゾンが森
224 林の健全性に悪影響を引き起こしている可能性があることを示している。一方で、森
225 林の樹木は大気だけでなく、生育する土壌や気象要因の影響も受けている。さらに、
226 他植物との競争、昆虫による食害、微生物との共生あるいは病気への感染など、きわ
227 めて多くの生物との相互作用も存在する。そのため、オゾン濃度やオゾン吸収量が高
228 いことだけで、森林衰退にオゾンが関与していると結論付けることはできない。森林
229 の樹木へのオゾンの影響を評価するには、現地におけるオープントップチャンバー実
230 験やオゾン耐性樹種との生育比較といった、現地調査が重要であるが、現時点では限
231 られた森林でしか行われていない。したがって、比較的高い濃度のオゾンが観測され
232 ている森林衰退地域の多くにおいては、オゾンの関与が否定できないものの、明確な
233 因果関係は示されていないのが現状といえる。

234

235 11. 参考文献

236 Hoshika, Y., Tatsuda, S., Watanabe, M., Wang, X., Watanabe, Y., Saito, H. & Koike,
237 T. (2013) Effect of ambient ozone at the somma of Lake Mashu on growth
238 and leaf gas exchange in *Betula ermanii* and *Betula platyphylla* var.
239 *japonica*. Environmental and Experimental Botany, 90, 12-16.

- 240 Kohno, Y. (2017) Decline of *Fagus crenata* in the Tanzawa mountains, Japan. In
241 *Air Pollution Impacts on Plants in East Asia*, Izuta, T., (ed.) Springer:
242 Tokyo, pp. 151-162.
- 243 Kume, A., Fujimoto, M., Mizoue, N., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2020)
244 Impact of reduced ozone concentration on the mountain forests of Mt.
245 Tateyama, Japan. *Environmental Pollution*, 267, 115407.
- 246 Kume, A., Nagafuchi, O., Akune, S., Nakatani, N., Chiwa, M. & Tetsuka, K. (2010)
247 Environmental factors influencing the load of long-range transported air
248 pollutants on *Pinus amamiana* in Yakushima Island, Japan. *Ecological*
249 *Research*, 25, 233-243.
- 250 Kume, A., Numata, S., Watanabe, K., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2009)
251 Influence of air pollution on the mountain forests along the Tateyama–
252 Kurobe Alpine route. *Ecological Research*, 24, 821-830.
- 253 Nagafuchi, O., Suda, R., Mukai, H., Koga, M. & Kodama, Y. (1995) Analysis of
254 long-range transported acid aerosol in rime found at Kyushu mountainous
255 regions, Japan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 85, 2351-2356.
- 256 Nakano, T., Yokoo, Y., Okumura, M., Jean, S.-R. & Satake, K. (2012) Evaluation of
257 the impacts of marine salts and Asian dust on the forested Yakushima
258 Island ecosystem, a world natural heritage site in Japan. *Water, Air, &*
259 *Soil Pollution*, 223, 5575-5597.
- 260 Sakata, M. (1996) Evaluation of possible causes for the decline of Japanese cedar
261 (*Cryptomeria japonica*) based on elemental composition and $\delta^{13}\text{C}$ of
262 needles. *Environmental Science & Technology*, 30, 2376-2381.
- 263 Sase, H., Takahashi, A., Sato, M., Kobayashi, H., Nakata, M. & Totsuka, T. (2008)
264 Seasonal variation in the atmospheric deposition of inorganic
265 constituents and canopy interactions in a Japanese cedar forest.
266 *Environmental Pollution*, 152, 1-10.
- 267 Sase, H., Takamatsu, T. & Yoshida, T. (1998a) Variation in amount and elemental
268 composition of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)
269 leaves associated with natural environmental factors. *Canadian Journal*
270 *of Forest Research*, 28, 87-97.
- 271 Sase, H., Takamatsu, T., Yoshida, T. & Inubushi, K. (1998b) Changes in properties
272 of epicuticular wax and the related water loss in Japanese cedar
273 (*Cryptomeria japonica*) affected by anthropogenic environmental factors.
274 *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 546-556.

- 275 Suto, H., Hattori, Y., Tanaka, N. & Kohno, Y. (2008) Effects of strong wind and
276 ozone on localized tree decline in the Tanzawa mountains of Japan. *Asian*
277 *Journal of Atmospheric Environment*, 2, 81-89.
- 278 Takahashi, M., Feng, Z., Mikhailova, T.A., Kalugina, O.V., Shergina, O.V.,
279 Afanasieva, L.V., Heng, R.K.J., Majid, N.M.A. & Sase, H. (2020) Air
280 pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review.
281 *Science of The Total Environment*, 742, 140288.
- 282 Takamatsu, T., Sase, H. & Takada, J. (2001) Some physiological properties of
283 *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto, Japan: potential factors causing
284 tree decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 663-672.
- 285 Watanabe, T., Izumi, T. & Matsuyama, H. (2016) Accumulated phytotoxic ozone
286 dose estimation for deciduous forest in Kanto, Japan in summer.
287 *Atmospheric Environment*, 129, 176-185.
- 288 Yamaguchi, T., Watanabe, M., Noguchi, I. & Koike, T. (2017) Tree decline at the
289 somma of Lake Mashu in northern Japan. In *Air Pollution Impacts on*
290 *Plants in East Asia*, Izuta, T., (ed.) Springer: Tokyo, pp. 135-150.
- 291 伊豆田 猛. (2001) 森林衰退. 野内 勇 (編) 大気環境変化と植物の反応, 養賢堂, pp.
292 168-208.
- 293 伊豆田 猛. (2006) 植物と環境ストレス. コロナ社, p. 232
- 294 伊豆田 猛, 小川和雄. (2004) 森林衰退の現状と取り組み (Ⅲ) 奥日光前白根山周辺の
295 ダケカンバ衰退と奥秩父亜高山帯のシラビソ立ち枯れ. *大気環境学会誌*, 39,
296 A65-A77.
- 297 伊藤江利子, 吉永秀一郎, 大貫靖浩, 志知幸治, 松本陽介, 埴田 宏. (2002) 関東平野
298 におけるスギ林衰退と土壌要因. *森林立地*, 44, 37-43.
- 299 神奈川県自然環境保全センター. (2017) 丹沢ブナ林再生指針.
- 300 亀岡喜和子, 三沢彰, ナスラフニサール. (1990) 年輪幅生長からみた関東平野にお
301 けるスギの衰退に関する研究. *日本緑化工学会誌*, 16, 1-10.
- 302 久米篤, 渡辺幸一, 永淵修, 朴木英治. (2011) 広域大気汚染の現状と森林生態系への
303 影響: 屋久島と立山の事例. *日本生態学会誌*, 61, 97-106.
- 304 越路 正, 相原敬次, 山根正伸, 田村 淳, 谷脇 徹. (2012) 丹沢山地におけるブナ林衰
305 退の現状. *神奈川県自然環境保全センター報告*, 9, 1-12.
- 306 斎藤正彦, 若松伸司, 相原敬次. (2013) 丹沢山地における樹木のオゾン取込み量の推
307 定. *大気環境学会誌*, 48, 251-259.
- 308 佐久間 彬, 渡辺 誠, 若松 歩, 川井田東吾, 小池孝良. (2013) 摩周湖外輪山における
309 森林衰退と土壌要因. *北方森林研究*, 61, 105-106.

- 310 佐久間 彬, 渡辺 誠, 若松 歩, 小林史和, 川井田東吾, 斉藤秀之, 小池孝良. (2014)
311 摩周湖外輪山ダケカンバ衰退木の葉の水分特性と土壤特性. 北方森林研究,
312 62, 61-64.
- 313 須田隆一, 宇都宮あきら, 大石興弘, 浜村研吾, 石橋龍吾, 杉泰 昭, 山崎正敏, 緒方
314 健, 清水英幸. (1992) 宝満山モミ自然林の衰退に関する調査. 環境と測定技
315 術, 19, 49-58.
- 316 高橋啓二, 梨本 真. (1993) 酸性雨等によるスギ衰退の原因を考察する／酸性降下物・
317 オキシダント説. 資源環境対策, 29, 145-154.
- 318 武田麻由子, 相原敬次. (2007) 丹沢山地の大気中オゾンがブナ (*Fagus crenata*) 苗に
319 及ぼす影響. 大気環境学会誌, 42, 107-117.
- 320 谷川東子, 高橋正通, 野口享太郎, 重永英年, 長倉淳子, 酒井寿夫, 石塚和裕, 赤間亮
321 夫. (2009) 奥日光の森林衰退地域の樹木生葉と土壤の養分特性－他の亜高山
322 地域との比較から－. 環境科学会誌, 22, 401-414.
- 323 谷本丈夫, 劉 岩, 里道知佳, 大久保達弘, 二瓶幸志. (1996) 奥日光・足尾・赤城山地
324 における森林衰退と立地環境. 森林立地, 38, 1-12.
- 325 田村俊樹, 米倉哲志, 中路達郎, 清水英幸, 馮延文, 伊豆田 猛. (2002) 前白根山周辺
326 におけるダケカンバの生育状況, 葉内成分および生育土壤に関する調査. 大
327 気環境学会誌, 37, 320-330.
- 328 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克. (1997a) 檜洞丸山頂における南
329 斜面ブナ衰退地と北斜面ブナ健全地の気象条件比較. 財団法人神奈川県公園
330 協会, 丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 (編) 丹沢大山自然環境総合
331 調査報告書, 神奈川県環境部, pp. 89-92.
- 332 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克 (1997b) 南斜面南斜面ブナ衰退
333 地と北斜面ブナ健全地の大気汚染濃度および土壤の比較. 財団法人神奈川県
334 公園協会, 丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 (編) 丹沢大山自然環境
335 総合調査報告書, 神奈川県環境部, pp. 93-96.
- 336 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克 (1997c) ブナ衰退地と健全地の
337 葉の生理特性、葉の特徴および葉内元素濃度比較とブナ衰退原因について.
338 財団法人神奈川県公園協会, 丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 (編)
339 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 神奈川県環境部, pp. 99-102.
- 340 梨本 真, 高橋啓二, 芦原昭一. (1993) 関東・甲信地方におけるスギ社寺林の衰退地と
341 健全地の土壤化学性の比較. 環境科学会誌, 6, 121-130.
- 342 梨本 真, 河野吉久. (1989) スギ衰退とオキシダント, 降水量の分布に関する一考察.
343 電力中央研究所報告 U89017, p. 24
- 344 畠山史郎. (1999) 奥日光地方における森林衰退と酸性降下物・酸化性大気汚染物質.

- 345 環境科学会誌, 12, 227-232.
- 346 畠山史郎, 村野健太郎. (1996) 奥日光前白根山における高濃度オゾンの観測. 大気環
347 境学会誌, 31, 106-110.
- 348 平野高司, 内田晶夫, 清田 信, 榎 幹雄, 相賀一郎. (1995) スギの光合成速度と葉面
349 拡散コンダクタンスに与える O_3 , NO_2 , SO_2 の単独および複合影響. 大気環境
350 学会誌, 30, 327-336.
- 351 松本陽介, 丸山 温, 森川 靖. (1992a) スギの水分生理特性と関東平野における近年
352 の気象変動－樹木の衰退現象に関連して－. 森林立地, 34, 2-13.
- 353 松本陽介, 丸山 温, 森川 靖, 井上敏雄. (1992b) 人工酸性雨 (霧) およびオゾンがス
354 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
355 林立地, 34, 85-97.
- 356 松本陽介, 小池信哉, 河原崎里子, 上村 章, 原山尚徳, 伊藤江利子, 吉永秀一郎, 大
357 貫靖浩, 志知幸治, 奥田史郎, 石田 厚, 埴出 宏. (2002) 関東平野における
358 樹木衰退の 1999 年～2001 年の状況. 森林立地, 44, 53-62.
- 359 丸田恵美子, 志摩 克, 堀江勝年, 青木正敏, 土器屋由紀子, 伊豆田 猛, 戸塚 績, 横
360 井洋太, 坂田 剛. (1999) 丹沢・檜洞丸におけるブナ林の枯損と酸性降下物.
361 環境科学会誌, 12, 241-250.