

日本の森林衰退とオゾンとの関係（案）

目次

1		
2		
3		
4		
5	1. はじめに	2
6	2. 丹沢のブナ	2
7	3. 立山のブナ	3
8	4. 関東平野のスギ	4
9	5. 屋久島のヤクタネゴヨウ	5
10	6. 摩周湖のダケカンバ	6
11	7. 奥日光のダケカンバ、オオシラビソおよびコメツガ	6
12	8. 宝満山のモミ	7
13	9. 奥秩父亜高山帯のシラビソ	7
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。本章では、その中でオゾンに関連した調査が行われた森林
23 衰退の事例を紹介する。なお、表 1 にそれらの調査において実施された観測及びオゾ
24 ン以外の衰退原因などをまとめた。

25

26 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
27 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	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	○	○	○	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	○			
関東平野	スギ	○		○	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	○			SO ₄ ²⁻ 沈着
摩周湖外輪山	ダケカンバ	○	○		乾燥ストレス
奥日光	ダケカンバ、 オオシラビソ、 コメツガ	○			ヒドロキシルラジカ ル、有機過酸化物、乾 燥ストレス
宝満山	モミ	○			
奥秩父亜高山帯	シラビソ	○			乾燥ストレス

28

29 2. 丹沢山地のブナ

30 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
31 いる。ブナの枯死は 1970~1980 年頃にまとまって発生しており(越路ら, 2012)、2000
32 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, 2017)。高標高域、特
33 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~西向き斜面を中心に
34 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原因などを調べるこ
35 とを目的とした現地調査(戸塚ら, 1997a, b, c; 丸田ら 1999)より、檜洞丸山頂付近の
36 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、葉の光合成速度、水利用

37 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が明らかになった。
38 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高く、衰退木では、
39 健全木に比べて水分ストレスを受けやすいことが示された。ブナの衰退原因を探るた
40 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した結果、いず
41 れも土壌 pH が 5.4 以上であったため、酸性降水物によって土壌が酸性化していると
42 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) や二酸化窒素
43 (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、ブナに対して
44 悪影響をおよぼしている可能性が指摘された。実際に、犬越路において実施されたブ
45 ナ苗によるオープントップチャンバー実験によって、現地のオゾンが葉の生理機能や
46 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いる(武田と相
47 原, 2007)。Suto *et al.* (2008)は、丹沢山地の大気に関する物質移流のモデルシミュレ
48 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フラックスが高
49 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、斎藤 (2013)は丹
50 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、オゾン吸収量が丹沢山
51 地の全域で樹木に悪影響を及ぼし得るレベルであり、特に標高の高い地点ではオゾン
52 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衰退にオゾンが
53 関与している可能性が指摘されている。

54 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
55 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
56 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
57 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
58 (Kohno, 2017; 神奈川県自然環境保全センター, 2017)。

59

60 3. 立山黒部アルペンルートのブナ

61 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
62 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
63 2450 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、道路沿いのブナ林
64 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、日本海
65 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れ
66 ていた。そこで、ブナ平 (標高 1180 m) のブナ・スギ混交林において、バス通行量、
67 大気汚染物質 (NO₂ とオゾン) 及び森林動態の関係についての調査が行われた (Kume
68 *et al.*, 2009)。平均 NO₂ 濃度は、バス通行量と高い相関を示し、道路際で最も高く、
69 道路から 70 m 離れた森林内でも影響が確認された。しかし、平均 NO₂ 濃度は極めて
70 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えている可能
71 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らず高い値を

72 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 2006 年の 7
73 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長が抑制され
74 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た。オゾン曝
75 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が知られてい
76 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起こすほどに
77 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スギの成長が
78 促進されたと考えられた。

79 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
80 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
81 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
82 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
83 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
84 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。
85 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)
86 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
87 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
88 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
89 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
90 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
91 変化し、ブナの競争力が高まる要因となっていたと考えられた。従来の研究では単一
92 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合、大
93 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能性が
94 あることを示す結果といえる。

95

96 4. 関東平野のスギ

97 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
98 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
99 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
100 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
101 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。
102 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、

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。

103 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
104 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
105 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
106 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
107 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
108 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
109 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
110 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
111 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
112 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
113 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
114 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
115 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。
116 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
117 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。
118 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
119 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)
120 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
121 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
122 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
123 る可能性も考えられる。以上より、スギ林の衰退のメカニズムは明らかになっていな
124 いものの、Takahashi *et al.* (2020)においても述べられているように、都市化や気候
125 変動そして大気汚染といった要因が複合的に関与して、樹木の健全性の低下や枯死に
126 つながったと考えられる。

127

128 5. 屋久島のヤクタネゴヨウ

129 屋久島では絶滅危惧種のヤクタネゴヨウの衰退が 1990 年に報告されている
130 (Nagafuchi *et al.*, 1995)。ヤクタネゴヨウの衰退を説明する仮説の一つは中国から越
131 境大気汚染として運ばれてくる高濃度のオゾンと SO₄²⁻の沈着である(Kume *et al.*,
132 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には冬季に多
133 量の非海塩性 SO₄²⁻が沈着していた。針葉からカリウム溶脱速度が増加しており、葉
134 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なるエチレン
135 放出速度も高まっていた。SO₄²⁻の沈着に伴う針葉からのカリウム溶脱は新潟県のスギ
136 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ン感受性は明
137 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不明であるが、

138 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高くなり、100
139 ppb を超えるような高濃度も観測されていることから、オゾンがヤクタネゴヨウの生
140 育に悪影響を引き起こしている可能性が指摘されている。越境大気汚染に関しては、
141 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、生態系構成要
142 素の元素構成や Sr や Nd の同位体比の調査(Nakano *et al.*, 2012)によって支持されて
143 いる。

144

145 6. 摩周湖外輪山のダケカンバ

146 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
147 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
148 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
149 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
150 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
151 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
152 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
153 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
154 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
155 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
156 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
157 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
158 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
159 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
160 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、
161 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
162 えていることが示唆された(Yamaguchi *et al.*, 2017)。

163 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
164 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
165 カンバの生育に影響を及ぼしてきた可能性がある。

166

167 7. 奥日光のダケカンバ、オオシラビソ及びコメツガ

168 栃木県の奥日光ではダケカンバ、シラビソ、オオシラビソ及びコメツガなどの衰退
169 が、亜高山帯の極相林において 1980 年度から観察されている(谷本ら, 1996)。この衰
170 退については更新木の苗木が生育していることから、亜高山帯における自然な樹木枯
171 死であるとの指摘もあるが(谷本ら, 1996)、現地では首都圏からの移流に由来する 100
172 ppb を超える高濃度のオゾンや(島山と村野, 1996)、オゾンに起因するヒドロキシル

173 ラジカル及び有機過酸化物が観測されており(畠山, 1999)、その森林への影響の可能
174 性も指摘されている。一方で首都圏からの大気汚染物質の流入とその沈着に伴う土壤
175 酸性化が森林衰退に寄与している可能性も指摘されたが、現地における土壤の pH や
176 養分利用性及び樹木葉の養分濃度の調査からは、それを裏付ける結果は認められな
177 かった(田村ら, 2002; 谷川ら, 2009)。しかしながら、谷川ら(2009)は他の亜高山地域に
178 比べて奥日光のコメツガの針葉と土壤は Mg 含量及び Mg/Ca モル比が低いことを報
179 告しており、土壤の低 Mg という立地特性がダケカンバなどの他の樹種も含めて、生
180 理的ストレスに対する感受性を高めている可能性を指摘している。また、前白根山に
181 おいてはダケカンバの衰退が主にみられる南東斜面において、夏季の土壤含水率とダ
182 ケカンバの葉の水ポテンシャルが、非衰退地のそれらに比べて有意に低かったことか
183 ら、夏季の乾燥が衰退地に生育するダケカンバの成長低下などに関与している可能性
184 が指摘されている(伊豆田と小川, 2004; 伊豆田, 2006)。

185

186 8. 宝満山のモミ

187 福岡県の宝満山ではモミの衰退が観測されており、1990年に須田ら(1992)が調査を
188 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、特に山頂付近で
189 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。特に大径木のモミにおい
190 て衰退が著しい傾向にあった。林内における雨や霧の pH や土壤の酸性度の調査の結
191 果、両者ともある程度の低い pH が認められたが、調査地点間での違いはなく、地点
192 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、宝満山におけるオ
193 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いないが、三郡
194 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 ppb を超えた
195 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いている可能
196 性を否定できなかった。

197

198 9. 奥秩父亜高山帯のシラビソ

199 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
200 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、土壤の pH、
201 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
202 の立ち枯れは尾根直下の土壤の保水力が乏しい地域に断続的に発生していた。降水の
203 汚染や土壤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
204 (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
205 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
206 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
207 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

208 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。

209

210 10. まとめ

211 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
212 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
213 オゾンの関与の可能性が指摘されている。一方で、丹沢山地や摩周湖外輪山で行われ
214 たオープントップチャンバー実験や立山で行われたオゾン耐性樹種との比較といった、
215 森林衰退原因を特定するための現地調査が行われていない調査事例もあるため、オゾ
216 ン影響との関連性が不明瞭な事例も認められた。また、Watanabe *et al.* (2016)による
217 と、北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。
218 このことは、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
219 が森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。

220

221 11. 参考文献

- 222 Hoshika, Y., Tatsuda, S., Watanabe, M., Wang, X., Watanabe, Y., Saito, H. & Koike,
223 T. (2013) Effect of ambient ozone at the somma of Lake Mashu on growth
224 and leaf gas exchange in *Betula ermanii* and *Betula platyphylla* var.
225 *japonica*. *Environmental and Experimental Botany*, 90, 12-16.
- 226 Kohno, Y. (2017) Decline of *Fagus crenata* in the Tanzawa mountains, Japan. In
227 *Air Pollution Impacts on Plants in East Asia*, Izuta, T., (ed.) Springer:
228 Tokyo, pp. 151-162.
- 229 Kume, A., Fujimoto, M., Mizoue, N., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2020)
230 Impact of reduced ozone concentration on the mountain forests of Mt.
231 Tateyama, Japan. *Environmental Pollution*, 267, 115407.
- 232 Kume, A., Nagafuchi, O., Akune, S., Nakatani, N., Chiwa, M. & Tetsuka, K. (2010)
233 Environmental factors influencing the load of long-range transported air
234 pollutants on *Pinus amamiana* in Yakushima Island, Japan. *Ecological*
235 *Research*, 25, 233-243.
- 236 Kume, A., Numata, S., Watanabe, K., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2009)
237 Influence of air pollution on the mountain forests along the Tateyama-
238 Kurobe Alpine route. *Ecological Research*, 24, 821-830.
- 239 Nagafuchi, O., Suda, R., Mukai, H., Koga, M. & Kodama, Y. (1995) Analysis of
240 long-range transported acid aerosol in rime found at Kyushu mountainous
241 regions, Japan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 85, 2351-2356.
- 242 Nakano, T., Yokoo, Y., Okumura, M., Jean, S.-R. & Satake, K. (2012) Evaluation of

243 the impacts of marine salts and Asian dust on the forested Yakushima
244 Island ecosystem, a world natural heritage site in Japan. *Water, Air, &*
245 *Soil Pollution*, 223, 5575-5597.

246 Sakata, M. (1996) Evaluation of possible causes for the decline of Japanese cedar
247 (*Cryptomeria japonica*) based on elemental composition and $\delta^{13}\text{C}$ of
248 needles. *Environmental Science & Technology*, 30, 2376-2381.

249 Sase, H., Takahashi, A., Sato, M., Kobayashi, H., Nakata, M. & Totsuka, T. (2008)
250 Seasonal variation in the atmospheric deposition of inorganic
251 constituents and canopy interactions in a Japanese cedar forest.
252 *Environmental Pollution*, 152, 1-10.

253 Sase, H., Takamatsu, T. & Yoshida, T. (1998a) Variation in amount and elemental
254 composition of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)
255 leaves associated with natural environmental factors. *Canadian Journal*
256 *of Forest Research*, 28, 87-97.

257 Sase, H., Takamatsu, T., Yoshida, T. & Inubushi, K. (1998b) Changes in properties
258 of epicuticular wax and the related water loss in Japanese cedar
259 (*Cryptomeria japonica*) affected by anthropogenic environmental factors.
260 *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 546-556.

261 Suto, H., Hattori, Y., Tanaka, N. & Kohno, Y. (2008) Effects of strong wind and
262 ozone on localized tree decline in the Tanzawa mountains of Japan. *Asian*
263 *Journal of Atmospheric Environment*, 2, 81-89.

264 Takahashi, M., Feng, Z., Mikhailova, T.A., Kalugina, O.V., Shergina, O.V.,
265 Afanasieva, L.V., Heng, R.K.J., Majid, N.M.A. & Sase, H. (2020) Air
266 pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review.
267 *Science of The Total Environment*, 742, 140288.

268 Takamatsu, T., Sase, H. & Takada, J. (2001) Some physiological properties of
269 *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto, Japan: potential factors causing
270 tree decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 663-672.

271 Watanabe, T., Izumi, T. & Matsuyama, H. (2016) Accumulated phytotoxic ozone
272 dose estimation for deciduous forest in Kanto, Japan in summer.
273 *Atmospheric Environment*, 129, 176-185.

274 Yamaguchi, T., Watanabe, M., Noguchi, I. & Koike, T. (2017) Tree decline at the
275 somma of Lake Mashu in northern Japan. In *Air Pollution Impacts on*
276 *Plants in East Asia*, Izuta, T., (ed.) Springer: Tokyo, pp. 135-150.

277 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.

- 278 168-208.
- 279 伊豆田 猛.(2006) 植物と環境ストレス. コロナ社, p. 232
- 280 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
281 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,
282 A65-A77.
- 283 伊藤江利子, 吉永秀一郎, 大貫靖浩, 志知幸治, 松本陽介, 埜田 宏.(2002) 関東平野
284 におけるスギ林衰退と土壌要因. 森林立地, 44, 37-43.
- 285 神奈川県自然環境保全センター.(2017) 丹沢ブナ林再生指針.
- 286 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
287 けるスギの衰退に関する研究. 日本緑化工学会誌, 16, 1-10.
- 288 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
289 影響: 屋久島と立山の事例. 日本生態学会誌, 61, 97-106.
- 290 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
291 退の現状. 神奈川県自然環境保全センター報告, 9, 1-12.
- 292 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
293 定. 大気環境学会誌, 48, 251-259.
- 294 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
295 森林衰退と土壌要因. 北方森林研究, 61, 105-106.
- 296 佐久間 彬, 渡辺 誠, 若松 歩, 小林史和, 川井田東吾, 斎藤秀之, 小池孝良.(2014)
297 摩周湖外輪山ダケカンバ衰退木の葉の水分特性と土壌特性. 北方森林研究,
298 62, 61-64.
- 299 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
300 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
301 術, 19, 49-58.
- 302 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・
303 オキシダント説. 資源環境対策, 29, 145-154.
- 304 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
305 及ぼす影響. 大気環境学会誌, 42, 107-117.
- 306 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
307 夫.(2009) 奥日光の森林衰退地域の樹木生葉と土壌の養分特性—他の亜高山
308 地域との比較から— . 環境科学会誌, 22, 401-414.
- 309 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
310 における森林衰退と立地環境. 森林立地, 38, 1-12.
- 311 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
312 におけるダケカンバの生育状況, 葉内成分および生育土壌に関する調査. 大

- 313 気環境学会誌, 37, 320-330.
- 314 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
315 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
316 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
317 調査報告書, 神奈川県環境部, pp. 89-92.
- 318 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
319 地と北斜面ブナ健全地の大気汚染濃度および土壌の比較. 財団法人神奈川県
320 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
321 総合調査報告書, 神奈川県環境部, pp. 93-96.
- 322 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
323 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.
324 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)
325 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.
- 326 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
327 健全地の土壌化学性の比較. 環境科学会誌, 6, 121-130.
- 328 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.
329 電力中央研究所報告 U89017, p. 24
- 330 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.
331 環境科学会誌, 12, 227-232.
- 332 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
333 境学会誌, 31, 106-110.
- 334 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
335 拡散コンダクタンスに与える O₃, NO₂, SO₂ の単独および複合影響. 大気環境
336 学会誌, 30, 327-336.
- 337 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
338 の気象変動—樹木の衰退現象に関連して—. 森林立地, 34, 2-13.
- 339 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
340 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
341 林立地, 34, 85-97.
- 342 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
343 貫靖浩, 志知幸治, 奥田史郎, 石田 厚, 埜出 宏. (2002) 関東平野における
344 樹木衰退の 1999 年～2001 年の状況. 森林立地, 44, 53-62.
- 345 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
346 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.
347 環境科学会誌, 12, 241-250.