



神奈川県

自然環境保全センター報告

第 9 号

Bulletin of the
Kanagawa Prefecture Natural Environment Conservation Center

No. 9

2012年（平成24年）3月

発刊にあたって

神奈川県自然環境保全センターは、森林を中心とした自然環境の保全や再生を推進するため、研究、普及、事業実施の部門を備えた中核組織として、平成12年度に創設されました。森林環境に関わる様々な問題に対応するために、当センターでは研究機関や大学および行政機関等多くの関係者のご支援、ご協力を得ながら保全対策に関する業務を実施してまいりました。

「自然環境保全センター報告」は、このような業務から得られた研究成果、自然情報及び知見を、県民および他の行政機関等に提供するとともに、記録・保存することを目的に作成しております。

神奈川県下において、原生的な自然を有する丹沢大山地域では、自然環境の劣化が依然として継続しており、県では「丹沢大山自然再生基本構想」に基づき策定した「丹沢大山自然再生計画（神奈川県）」を2007年（平成19年度）より実施し、ブナ林の再生、自然公園の適正利用、野生生物の保護管理、あるいは県有林の整備や管理など様々な事業に取り組んでいます。同計画は2012年（平成24年度）から第2期を迎え、第1期で得られた成果を踏まえて、着実な保全・再生に向けてさらなる取り組みが求められます。

そこで、今回発行する第9号では、平成19年度から23年度にかけて5年間で行ったブナ林衰退機構解明プロジェクトの成果を中心に編集しました。

今期のブナ林衰退機構解明プロジェクトは、前期（平成13年度～18年度）で明らかにした「大気汚染」「ブナハバチ」および「水分ストレス」を原因とする複合的な衰退機構をさらに掘り下げ、丹沢山地のブナ林再生への方向を探ることに力点を置いています。研究体制では、引き続いて研究連携課が中心となり環境科学センター、農業技術センターの県下研究機関に加えて、愛媛大学、東海大学、酪農学園大学、国立環境研究所など外部の研究機関とも共同して取り組み、短期に高度で有用な成果を得ることに努めてきました。本特集ページ「丹沢山地のブナ林衰退研究の最前線」には、外部機関からの投稿も含め主な成果を掲載しました。引き続き調査研究が必要なものもありますが、今後の丹沢におけるブナ林再生の基礎的な知見として、全国的にも問題化しているブナ林などの森林衰退現象の解明の一助として役立つことを願って公表することとしました。

本号では特集に加えて、当センターが県民やボランティアと協働により取り組んでいる活動の報告として「2011年度丹沢大山の水場の水質調査結果」と「神奈川県自然環境保全センターに救護された傷病鳥獣の記録（2010年度）」なども併せて掲載しております。

当センターでは、今後とも自然環境の保全と再生に関わる業務や研究内容の充実に努めるとともに、成果や業績につきましては、本報告書以外にもホームページなどで紹介しておりますので、ご意見をいただくとともに、業務等の参考としてご活用いただければ幸いです。

平成24年3月

神奈川県自然環境保全センター所長 益 子 篤

目 次

発刊にあたって

特集 丹沢山地のブナ林衰退研究の最前線

ブナ林の衰退実態調査

丹沢山地におけるブナ林衰退の現状（総説）	1
越地 正・相原敬次・山根正伸・田村 淳・谷脇 徹	
丹沢山地におけるブナ衰退の時空間的特性（原著論文）	13
山根正伸・鈴木 透	
神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン暴露と水欠乏の複合影響の実験的解析（原著論文）	23
伊藤祥子・笹川裕史・相原敬次・清水英幸	

ブナ林の立地環境調査（大気・気象）

神奈川県丹沢地域の太気環境（調査・研究報告）	33
斎藤正彦・若松伸司・岡崎友紀代・國元浩平・松隈大亮・ 下村佳史・相原敬次・山根正伸	
ブナ林衰退地域における総合植生モニタリング手法の開発（調査・研究報告）	45
武田麻由子・小松宏昭	
フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いた 丹沢山におけるオゾン移流フラックスの評価（調査・研究報告）	53
武田麻由子・小松宏昭・飯田信行	

ブナの生理・生態調査（水ストレス）

丹沢山地におけるブナの樹液流計測による蒸散と環境要因に関する検討（原著論文）	61
相原敬次・越地 正・谷脇 徹・山根正伸・武田麻由子・田渕尚一・清水英幸	
短時間のオゾン（O ₃ ）暴露がブナ苗の転流パターン および生理活性に及ぼす影響調査（原著論文）	73
関 達哉	

ブナの葉食昆虫調査（ブナハバチ）

丹沢山地において大量発生したブナハバチ対策への取り組み（総説）	81
谷脇 徹・山根正伸・田村 淳・相原敬次・越地 正	
丹沢山地におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への被害状況の 経年変化（2008-2011）（調査・研究報告）	91
谷 晋・伴野英雄・山上 明	
檜洞丸におけるブナハバチの大発生によるブナの衰弱枯死（調査・研究報告）	95
越地 正・谷脇 徹・相原敬次・山根正伸	
ブナハバチ雌の前蛹期における休眠期間（調査・研究報告）	105
谷 晋・山上 明・伴野英雄	

ブナハバチ捕食寄生蜂の種構成と形態的特徴

—丹沢山天王寺尾根における3年間の調査事例—（資料）	----- 111
谷脇 徹・渡辺恭平	

ブナ林の保全再生事業

丹沢のブナ林衰退地における天然更新の状況

—再生事業地における3年後の調査から—（原著論文）	----- 119
田村 淳・谷脇 徹・井田忠夫・中西のりこ・吉田直哉	

速 報

2011年度丹沢大山の水場の水質調査結果	----- 127
大木伸一・丹沢大山ボランティアネットワーク	

資 料

神奈川県自然環境保全センターに救護された傷病鳥獣の記録（2010年度）	----- 131
加藤千晴	

丹沢山地におけるブナ林衰退の現状

越地 正*・相原敬次*・山根正伸*・田村 淳*・谷脇 徹*

The Current State of Decline of Beech (*Fagus crenata*) Forests in the Tanzawa Mountains

Masashi KOSHIJI*, Keiji AIHARA*, Masanobu YAMANE*,
Atsushi TAMURA* and Tooru TANIWAKI*

1 丹沢のブナ林

日本列島においてブナ林は、北海道の渡島半島から九州の南端まで広範囲に分布している。ブナ林は多雪地帯に分布する日本海側のブナ林と、多様な樹種が混交する太平洋側のブナ林に大きく分けられる。太平洋側のブナは約一万年前から後氷河期以降の気候温暖化過程のなかで、葉の小型化・狭葉化する形で適応してきたものである(安田, 1985)。丹沢のブナは太平洋側のブナ林に分類され、その形態的特徴を有しており、標高700~800 m以上の高標高域にみられる貴重な樹木である。丹沢では比較的まとまりのあるブナ林は、標高1,000 m以上の山地主稜線沿いの尾根筋や緩斜面にみられる。このような場所は火山灰が厚く堆積し適潤性の良好な土壌からなっている。ブナの生育状況は、ブナ高木のみを対象とした場合、平均すると胸高直径45 cm、樹高17 mで、1ヘクタール当たりの本数は約250本となる(表1)。ブナの樹齢については、40本のブナの年輪調査から胸高直径との関係式を作成した(図1)。この式から樹齢を推定すると、胸高直径45 cmで150年、胸高直径が80 cmを越えるものは300年以上となる。なお、年輪調査木中の最高樹齢は396年である。このように丹沢のブナ林は大径木の混じる高齢な森林が特色となっている。

2 丹沢ブナ林の衰退状況

丹沢ブナ林を構成する高木は、広葉樹ではブナ、

イヌブナ、カエデ類、シナノキ、サワグルミ、針葉樹ではモミ、ツガ、ウラジロモミ、ハリモミなどである。これらのなかで立ち枯れが目立ち、問題となっている樹種はブナ、モミ、ウラジロモミである。丹沢山地は急峻で崩壊地が多いため、山地全体の衰退状況を広域的に捉えるためには航空写真を利用するのが効率的である。1985年8月撮影の航空写真を用いて立ち枯れの状況を調べたところ、丹沢山地の主稜線と主稜線から派生する支尾根沿いに多いことがわかった(越地ら, 1996)。立ち枯れが目立つ場所は丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸の山頂周辺である。標高別にみると、立ち枯れ木の85%以上が標高1,000 m以上にあり、その頻度は特に標高1,400 m以上で高くなる傾向がみられる。斜面方位では、立ち枯れは南ないし南東向きの斜面に多いが、北向きの斜面には少ない。また、立ち枯れが確認された範囲の面積は、標高1,000 m以上の面積の28%を占めている。その後、2002~2004年にブナ林の衰退調査をした結果でも、ブナの衰退が進行している場所は1985年時点の立ち枯れの多かった場所とほぼ一致している(山根ら, 2007 a、図2)。

丹沢ブナ林が衰退した時期を、塔ヶ岳、丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸の各山頂付近においてほぼ5年おきに撮影した航空写真を用いて解析した結果、1980年の航空写真から異常が明らかに認められる衰退度2以上のブナの割合が増えている(神奈川県, 1994、図3)。

表1 丹沢山地の10か所におけるブナの生育状況(越地, 2002)

調査地	標高 m	傾斜度	傾斜方向	平均胸高直径 cm	平均樹高 m	ha当たり本数 本
丹沢山頂南面1	1440	22	S E	40.2	18.8	380
丹沢山頂南面2	1450	15	E	31.0	15.3	460
天王寺尾根1	1260	8	平坦～S	47.7	16.6	240
天王寺尾根2	1220	14	N	57.0	14.4	140
堂平上部	1190	20	S	74.2	23.4	100
堂平中部	1170	9	S	36.9	19.7	400
檜洞丸1	1530	20	S	50.4	15.7	180
檜洞丸2	1540	20	NW	39.8	16.3	120
前大室山	1520	30	SW	41.1	12.4	200
加入道山	1500	17	E	32.8	14.1	266

10×50mの標準地、ブナ高木(樹高10m以上)の占める割合が高い林分

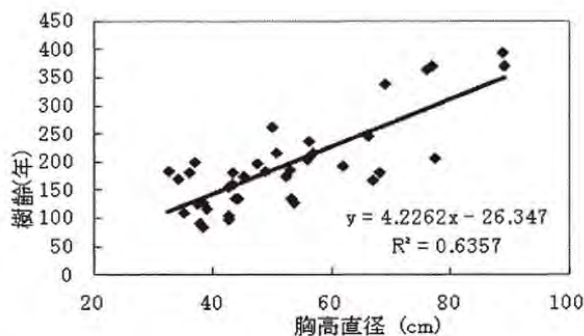


図1 ブナの胸高直径と樹齢の関係(越地, 2006)

(40本の個体の年齢解析による)

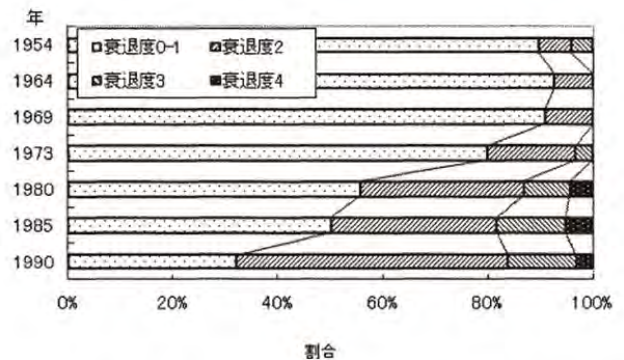


図3 蛭ヶ岳の航空写真判読によるブナ衰退度の経年変化(神奈川県, 1994)

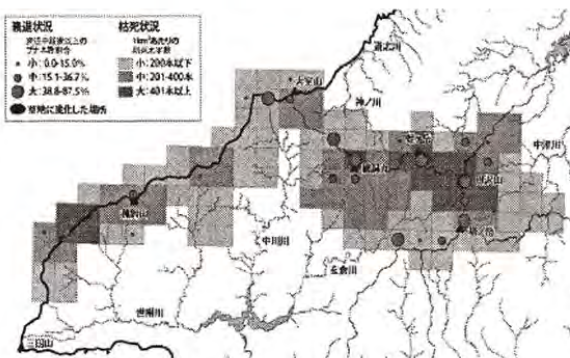


図2 丹沢山地のブナ林の衰退状況(山根ら, 2007a)

丸印は2002-2004年の現地調査による衰退状況
メッシュは1985年の航空写真判読による枯死状況
(モミ類を含む)

年輪には過去の気候や環境の変化などが刻まれており、これらの出来事を知る手がかりとして利用される。鈴木(1992)は衰退の問題となった大山モミや、神奈川県内各地のモミやスギの年輪にほぼ共通して1960年から1970年にかけて年輪幅が急激に減

少することを報告している。一般に年輪幅の変化は気象の影響を受けやすいとされているが、この場合は気象以外の要因が加わって生じたものとしている。そこでブナの年輪解析を行った結果、ブナはモミより正円性に欠けるのであればつきは大きい、1970年から1980年頃にかけて環境変化により年輪幅が低下する個体が多く認められた(越地ら, 2006, 図4)。航空写真の判読と年輪調査の結果から推測すると、1980年頃からブナの立ち枯れが目立ち始めたと考えられる。大山モミ林の場合は1960年代から1970年代前半にかけて立ち枯れが目立ったが、丹沢のブナ林の場合は大山のモミ林より10年以上遅れて衰退が進行したことになる。

ブナ林の衰退で特に問題となる点は、その衰退が現在も進行していること、衰退の跡地に後継樹が育たずギャップが拡大していることである(写真1、図2)。衰退が最も進んでいる檜洞丸山頂の南向き

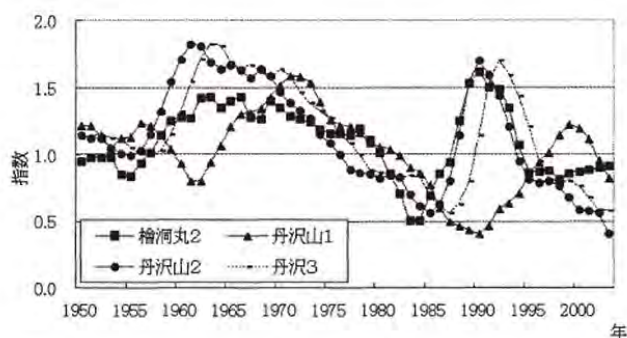


図4 丹沢山地ブナの年輪幅の変化(越地, 2006)

4本のブナを解析した。縦軸の指数は年輪幅の変化を最適指数曲線式にあてため、実際の年輪幅との比を求め年輪幅を標準化したもの。



写真1 檜洞丸におけるブナの立ち枯れ状況
(1991年8月2日鈴木清氏撮影)

斜面では調査区域内の20%が草地化している(神奈川県, 2009、図5)。これは1980年頃の衰退開始とともにブナ等の枯死が徐々に拡大したもので、その跡地がシカの強い採食圧を受けたため後継樹が育たず、オオバイケイソウやマルバダケブキなどシカの不嗜好性植物が繁茂し、草地が拡大していったものである。

丹沢山地では標高1,200m以上になると、モミに代わってウラジロモミがブナ等に混じって分布している。ウラジロモミの立ち枯れもブナの立ち枯れと同じ頃から目立ち始めたと思われる。1990年代には高標高地にシカが増加したこともあり、ウラジロモミ、アオダモ、リョウブ等がシカにより樹皮剥ぎされた。高齢なウラジロモミには幹の全周が樹皮剥ぎされることにより枯死する個体が発生した(写真2)。最近ではウラジロモミの幹にネットを巻くことにより樹皮剥ぎを防いでいる。

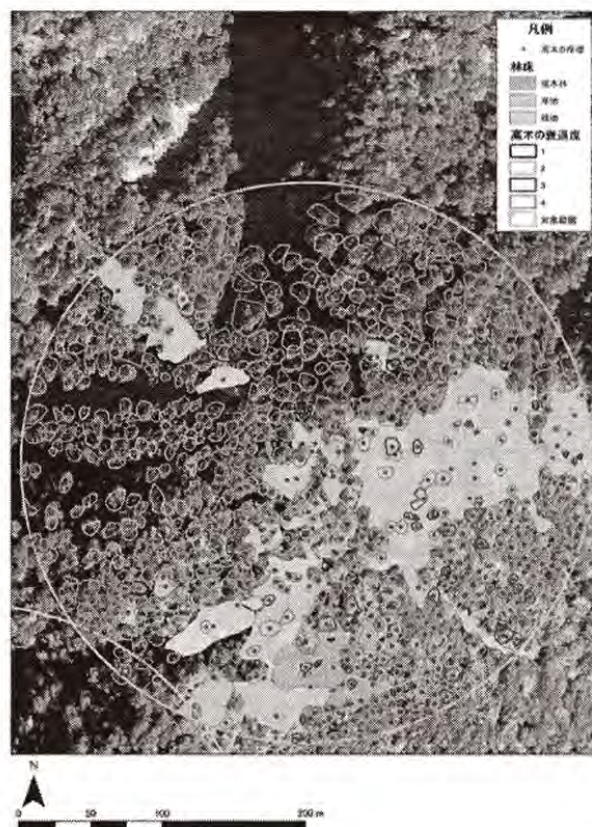


図5 檜洞丸山頂付近の草地化の状況(神奈川県, 2009)

大円(12.56ha)内の草地(白く抜けている部分: 2.5ha)が20%を占める。



写真2 ウラジロモミのシカによる樹皮剥ぎ被害
(1995年12月撮影)

3 ブナ林の衰退原因

ブナの衰退が目立つ地域は、高標高地の尾根から南向き斜面にかけてという地形条件下にある場所であること、また、枯死する個体は直径の太いものから細いものまで広範囲にわたることから、衰退原因は老齢化など樹木自体の要因ではなく、何らかの外部要因が働いて起きていると思われる。ブナ林の衰退メカニズムは、全て解明されているわけではなく未解明の点も多いが、現時点では、大気汚染、病害虫被害（ブナハバチ）、水ストレスが主要な要因としてあげられている（相原ら、2004；山根ら、2007b）。

(1) 大気汚染

さまざまな大気汚染物質のうち樹木に大きな影響を与えるものとしては、二酸化硫黄、酸性雨、光化学オキシダント（オゾン）が主なものである（図6）。

ア 二酸化硫黄

二酸化硫黄は重油や石炭の燃焼など主として工場の生産活動から排出されるもので、かつては大気汚染の大きな原因になっていた。京浜工業地帯では1965年に硫黄酸化物の排出量が最大（神奈川県、1994）であり、1967年の京浜工業地帯の硫黄酸化物

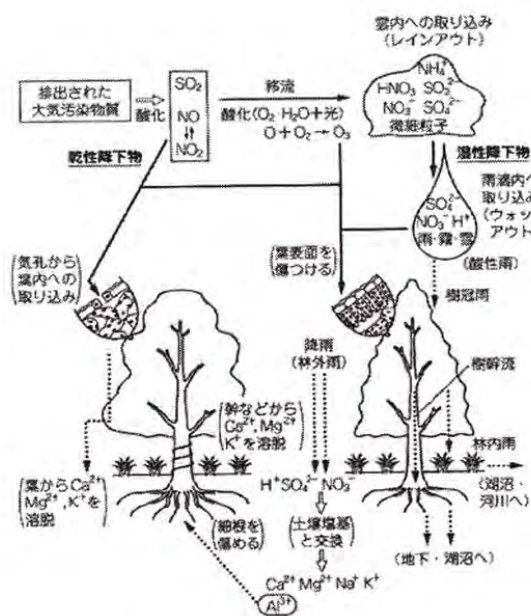


図6 樹木や土壌への大気汚染物質や酸性雨の影響（若松・篠崎、2001）

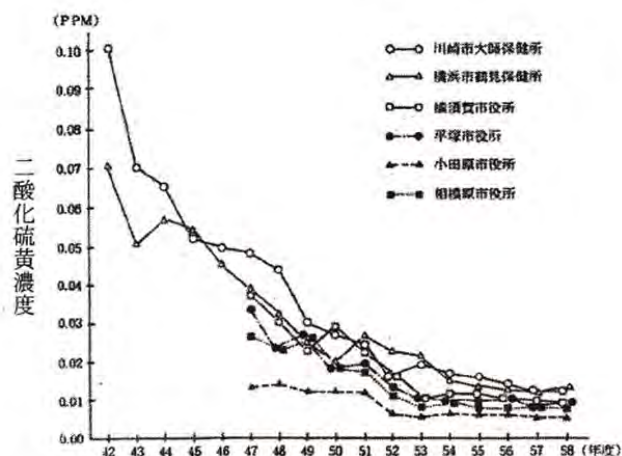
硫黄酸化物；SO₂、オゾン；O₃、酸性雨；湿性降下物

濃度は100ppbを超える高濃度を示す地区もあった（神奈川県、1984、図7）。当時の川崎市臨海部では樹木の葉に可視被害が認められている（鈴木ら、1973）。しかし、その後の排出源対策により硫黄酸化物濃度は徐々に低下し、2009年時点では二酸化硫黄濃度の年平均値が4 ppbときわめて低い濃度となっている（神奈川県、2010）。1960年代に京浜工業地帯から排出された二酸化硫黄等の汚染物質は、春から夏にかけて相模湾を介した海陸風循環により丹沢山地に移流する（相原ら、1982）と考えられ、丹沢山地に移流した高濃度の二酸化硫黄はブナ林の成長低下に影響を与えた可能性がある。

イ 酸性雨および酸性霧

酸性雨は1980年頃から樹木が衰退する原因ではないかとして調査研究が開始された。人工酸性雨を用いての実験では、pH2.0の酸性雨では多くの樹木に可視被害と成長低下が認められ、pH3.0の酸性雨では可視被害は広葉樹には認められるが、針葉樹では認められない（河野ら、1994）。このように酸性雨による樹木被害はpH3.0以下でないと現れないのに対し、現在降っている雨のpHは4.5前後であるため可視被害はみられない状況にある。

しかし、酸性雨が降り続くことによる土壌酸性化への影響も懸念されたので、この点を確認するために丹沢山地の主要な山頂で土壌の酸性度を測定したところ、丹沢山と塔ヶ岳でのpHは5.9、蛭ヶ岳は



昭和

図7 主要一般環境測定局における二酸化硫黄の経年変化（神奈川県、1984）

pH5.1を示し、特に酸性化している兆候は認められなかった(越地ら, 2005)。丹沢山地に分布する弱酸性の火山灰土壌は、酸性雨を中和する能力が高いため酸性化が進行しにくい一因になっている。

酸性霧は大気中での滞留時間が長く、雨と比べて霧滴の径が小さいため単位面積当たりの表面積が大きい。従って、酸性物質が溶け込みやすくなり、雨より酸性度が強く大気汚染物質の濃度も高くなる。このため、酸性霧は酸性雨より樹木への影響が大きいとされている(井川, 1992)。このことについて、神奈川県が大山下社で1990年から1992年の3年間にわたり酸性霧を観測した結果、pH3.0以下の酸性度の強い霧は6回観測され、その発生頻度は2.7%、最大の発生時間12時間、最低のpHは2.55であった。1960年代は京浜工業地帯から排出された二酸化硫黄等汚染物質の移流により、1990～1992年の調査時よりも酸性度の強い霧が発生し、森林衰退に影響を及ぼしたのではないかと推察されている(神奈川県, 1994)。

ウ オゾン

オゾンには成層圏オゾンと対流圏オゾンがある。成層圏オゾンは生物に有害な紫外線を防ぐオゾン層で「良いオゾン」といわれるのに対し、対流圏オゾンは地表付近では生物に被害を与える「悪いオゾン」といわれる。地表付近の悪いオゾンは工場や自動車から排出される窒素酸化物や炭化水素が太陽からの紫外線を受けて複雑な光化学反応を起こすことにより生成されるもので、酸化能力の強い有害な物質である。オゾンは現状の濃度レベルでも光合成速度に影響を与え、長期間の暴露によって成長が低下する。このことについて、武田・相原(2007)は、西丹沢犬越路においてブナの苗木を用い、大気中のオゾンを含んだ大気とオゾンを浄化した大気を暴露する比較実験を行い、実験3年目にオゾンの影響によるクロロフィルの減少と落葉が早まることにより、成長量が約60%低下することを示した。

一方、河野ら(2001)はオゾンと二酸化硫黄の複合影響の実験では、オゾン単独よりも二酸化硫黄を付加した場合にはさらに成長が低下するとしている(図8)。1960年代に京浜工業地帯で発生した高濃度の二酸化硫黄とともに、オゾンも丹沢山地に移流

し、ブナ林に複合的な影響を及ぼした可能性がある。神奈川県(1994)は、1960年代の二酸化硫黄濃度は、大山では1965年には10～20ppbであったと推定している。

また、1972年の神奈川県都市部のオゾン濃度は、年平均値で50ppbであったことから、大山ではこの値よりさらに高かったと推定している。これらの結果に基づいて、大山における1960年代の推定値を二酸化硫黄濃度20ppb、オゾン濃度60ppbとして、これらを複合影響の実験データ(河野ら, 2001、図8)に当てはめてみると、ウラジロモミやブナの苗を用いた場合、約40%の成長低下が読み取れる。現地に生育する高齢のモミに同じ程度の影響が現れるとはいえないが、当時の高濃度の二酸化硫黄とオゾンの複合影響により、かなりの成長低下が引き起こされるものと思われる。

神奈川県は都市部(一般環境大気測定局)に加え、山地の西丹沢犬越路(標高920mにある研究用測定局)でオゾン濃度を観測している。オゾン濃度の年平均値をみると山地は都市部の約2倍の高い濃度で推移している(図9)。実際、丹沢山地において暴露型パッシブサンプラーによりオゾン濃度を測定したところ、蛭ヶ岳、檜洞丸、丹沢山などの山頂付近の風当たりの良い地点でオゾン濃度が高まること、さらに標高が高くなるほどオゾン濃度が高まることわかった(阿相ら, 2007、図10)。山岳地帯においてオゾンを連続観測した事例はきわめて少ないが、神奈川県では電力中央研究所と共同で檜洞丸の山頂近く(標高1,540m)に、ソーラーパネルと風力発電機から電力を供給する方式でのオゾン観測を2004年から始めている(写真3)。2004～2005年の観測結果では、年平均値は42ppbであり、100ppbを超える高い濃度も観測されている。オゾン濃度は都市部では日中にピークがみられるのに対し、檜洞丸では日変化は小さいが、夏には夜間に高くなることわかった。また、ブナの衰退が南向き斜面に多くみられる原因には、地形に起因する局地風の影響が大きく、風速が強まることによりオゾン移流フラックスとして影響しているためではないかと推察されている(河野ら, 2007)。

大気汚染のうちでは、オゾンが最もブナ林の衰退に影響を及ぼしている可能性が高い。しかし、現状

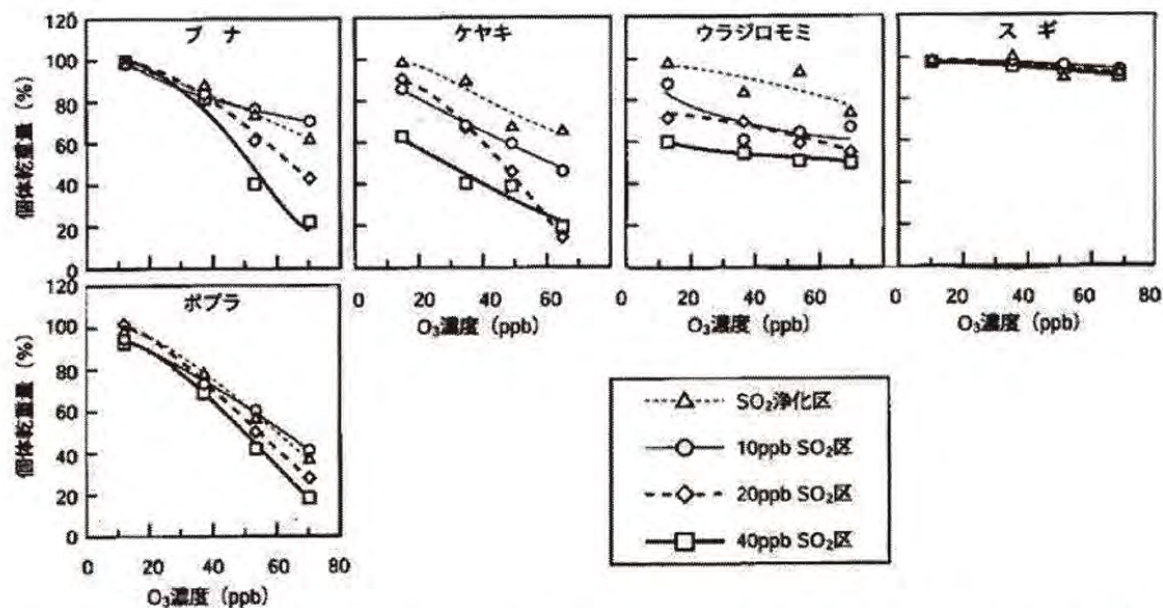


図8 個体乾重量に及ぼすオゾン(O₃)と二酸化硫黄(SO₂)の複合影響(河野ら, 2001: 一部抜粋)

ウラジロモミはSO₂の影響大
 ブナはSO₂とO₃との複合影響大
 スギは両者の影響小

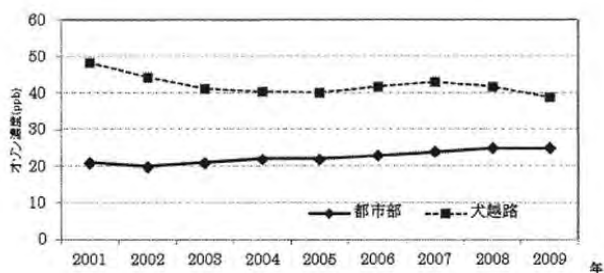


図9 都市部と犬越路のオゾン濃度(年平均値)の変化(神奈川県, 2010)

都市部: 60地点の平均値、犬越路: 1地点

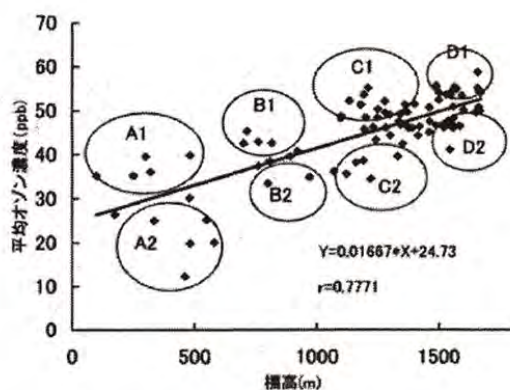


図10 標高とオゾン濃度との関係および調査地点の分類(阿相ら, 2007)

A1・B1・C1・D1: 尾根など風当たりの良い地点
 A2・B2・C2・D2: 谷筋や周囲に樹木が多い地点

のオゾン濃度ではブナの成長低下を引き起こすことはあっても、枯死するまでには至らないであろう。

(2) 病虫害(ブナハバチ)

丹沢山地では1993年に初めてブナハバチの大発生が記録されている。その後もたびたび大発生を繰り返し、2007年と2011年には今までにない大規模な発生となっている(表2)。ブナハバチは2000年に新種として記載された。これにより標本の比較が可能となり、全国のブナ林にも広く生息していることが判明している。丹沢山地以外でも大発生の記録はあるが、繰り返し大発生がみられるのは丹沢山地だけである。この幼虫はブナとイヌブナを食害するが、丹沢山地ではブナの方が食害される。ブナの被害はブナハバチの幼虫が5月下旬から約1か月間にわたりブナの葉を食害するもので、大発生時には6月中下旬頃ブナ林に行くと、終齢に近い幼虫の糞が雨のようにばらばらと音を立てて落ちるほどである。この頃にはブナの幹などに多数の幼虫が登っていく様子が観察できる(写真4)。

このような幼虫の食害を受けたブナは、葉を全て食べ尽くされ、丸坊主になる激害型の症状がみられる(写真5)。丸坊主にされたブナは8月になると

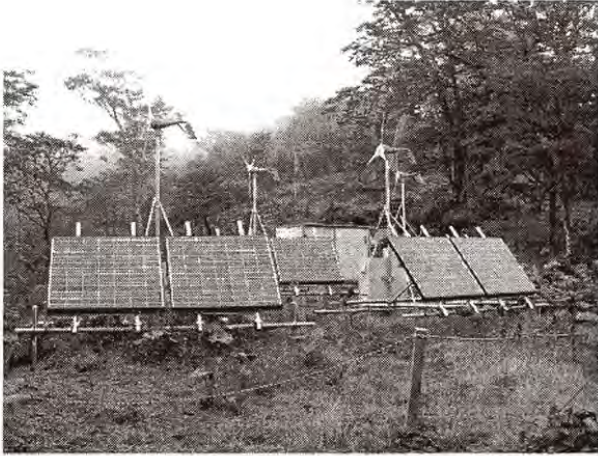


写真3 檜洞丸山頂近くのオゾン観測装置
(2005年8月12日撮影)

表2 丹沢山地でのブナハバチの発生経緯
(越地ら, 2012)

	檜洞丸周辺	丹沢山周辺
1993年	○	○
1994年	○	△
1995年	△	△
1996年	△	△
1997年	○	○
1998年	○	○
1999年	○	○
2000年	△	△
2001年	△	△
2002年	○	△
2003年	○	△
2004年	○	△
2005年	○	○
2006年	△	△
2007年	◎	○
2008年	△	△
2009年	△	△
2010年	△	△
2011年	◎	○

◎：大規模(激害発生率70%以上)
○：中規模(激害発生率30%前後)
△：小規模(激害発生率10%以下)

新芽(通常は翌年春に開く芽)から再び葉を展開させる。この二次開葉した葉はその年の成長を補うためのものであるが、夏の暑い時期に展開したばかりの柔らかい葉であるため光合成能力はかなり低下する。激害を受けても大部分のブナは二次開葉をするが、衰弱したブナには二次開葉しない個体もある。地形条件との関係では、ブナハバチによる被害は北



写真4 ブナの幹をよじ登るブナハバチの幼虫
(1997年6月11日撮影)

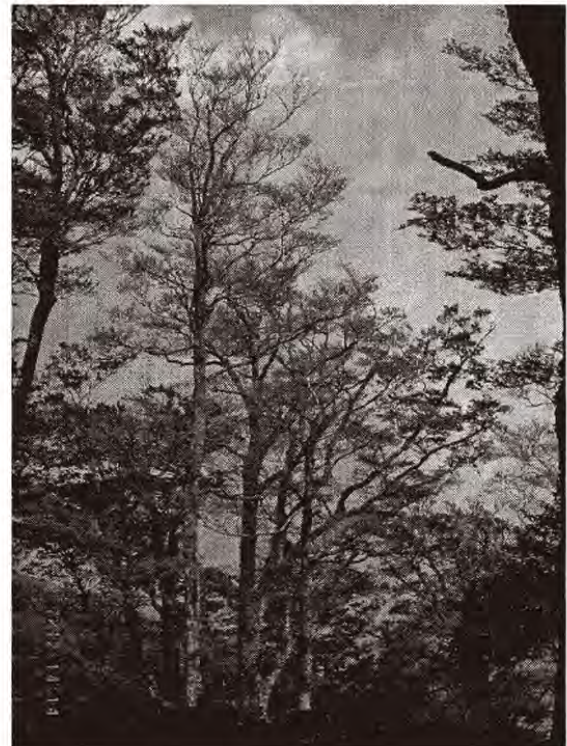


写真5 ブナハバチの食害で丸坊主にされたブナ
(2011年7月12日撮影)

食害直後は褐変する

向き斜面より南向き斜面に多く見られる。南向き斜面に生育するブナは開葉時期によるばらつきが大きい、とくに開葉の遅れる個体ほどブナハバチ被害を受けやすい傾向がある(田村, 2005)。ブナハバ

チによる激害を受けたブナは、短期間に全ての葉を失うことになるため、樹体内の同化物質の消耗が激しく樹勢が低下する。激害を受けたブナは翌年には枝枯れの発生がみられ、その後徐々に葉量が減少し衰弱していく経過をたどる。比較的健全なブナが、13年間に4回も食害を受けた後に枯死した事例もある。また、衰弱したブナでは1～2年の短期間で枯死する事例も観察されている。

一般的に広葉樹は昆虫による葉の食害を受けても枯死することはないとされているが、ブナハバチ被害の場合は同じ個体が繰り返し被害を受ける傾向があるため枯死する事例が認められる。檜洞丸の山頂付近のブナについて調査したところ、ブナハバチの発生が確認された1993年から2010年までの18年間に、調査本数204本のうちの32%にあたる65本のブナが枯死し、そのうちの46本がブナハバチの被害を受けていた(越地ら, 2012)。一方、東丹沢の堂平から丹沢山山頂までの調査ルートでは1997年から2006年までの10年間に調査本数98本のうちの16本のブナが枯死したと報告されている(山上ら, 2007)。これらの枯死事例はいずれも長期間の観察により判明したもので、ブナハバチによる繰り返しの食害を受けた影響が大きいとしている。

ブナハバチは2006年以前では大発生しても、激害の発生率が30%前後であったのに対し、2007年には70%以上のブナが激害を受けるという大規模な被害が檜洞丸や大室山など西丹沢を中心とする地域に発生している(谷ら, 2008; 越地ら, 2008)。さらに2011年にも2007年に匹敵する大規模な被害が発生した(越地ら, 2012)。特に衰退が進んでいる檜洞丸では、ブナハバチの大発生の回数が多いことも影響して、近年ブナの枯死が増加傾向にある。今後このような被害がたびたび発生することになるとブナの衰弱枯死が急速に進行する恐れがある。

(3) 水ストレス

都市域同様丹沢山地でも気温は上昇傾向にある。丹沢山地では長期間の観測データがないため、横浜地方気象台海老名観測点のデータを用いて検討すると、1980年から2010年までの31年間に年平均気温は約1.5℃上昇している(図11)。山地の気温は気温低減率(脚注: 標高100m上がるごとに気温が約0.6

℃下がること)により推定できることから高標高地でも同程度の気温上昇が推測される。その上、丹沢山地では1990年頃から少雪化の傾向が顕著になっている(山根ら, 2007b)。このように気温上昇、少雪化などにより山地全体としては乾燥化傾向にある。

ブナは水不足の状態すなわち水ストレスに敏感な樹種といわれている。南向き斜面に多くみられるブナの衰退地は、春から夏にかけて南からの風を受けやすい場所でもある。実際に南からの主風が吹き付

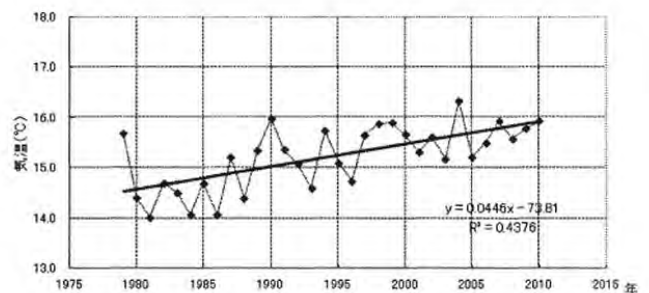


図11 海老名における年平均気温の変化

(横浜地方気象台公開データより作成)

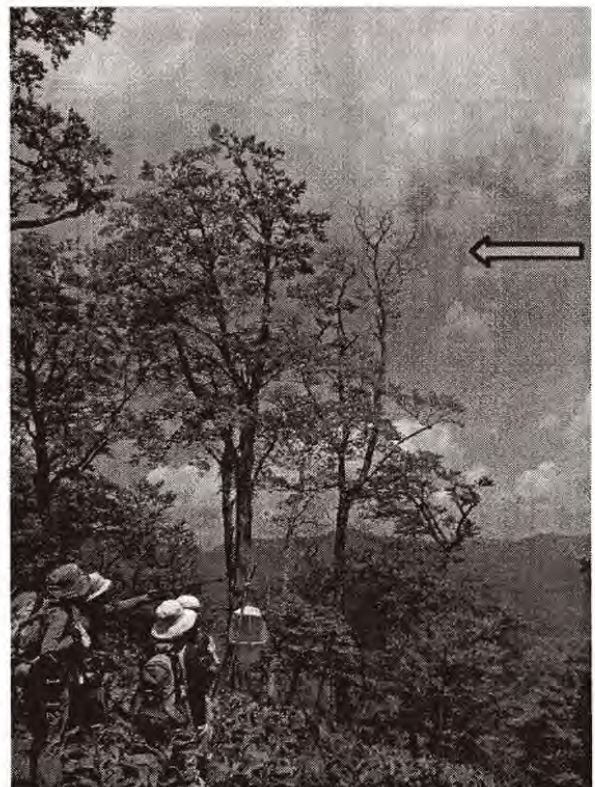


写真6 南風を受ける側から枝枯れが進むブナ(檜洞丸)(2010年6月1日撮影)

矢印方向からの風

ける面からブナの枝枯れが進み衰弱していく事例が認められる(写真6)。このような場所は水ストレスを強く受け衰弱が進むだけでなく、オゾンの影響も受けやすい。このことについて、伊豆田(2006)はオゾンと水ストレスの複合影響についての調査結果から、著しい成長低下がみられたとする事例を紹介している。しかし、水ストレスにより気孔閉鎖が起こればオゾンの吸収量を減少させるため、両者がそれぞれの影響を打ち消しあうように作用し、成長低下がみられなかったとする事例も紹介しており、必ずしも衰弱に結びつくとは限らない。

いずれにしても自然条件下では室内実験のように環境要因を制御できないため、現在、檜洞丸で水ストレスの単独要因がブナの衰弱にどの程度影響を与えているかを調べている。樹木が水ストレス状態にあるかどうかを評価するには水ポテンシャルという物差しが用いられる。水ポテンシャルは樹体内の水が引っ張り上げられている力を測定するもので、プレッシャーチャンバーという器械で測る。夜明け前の蒸散が始まる前に水ポテンシャルを測ることにより土壌の水分状態も評価することができる。檜洞丸で健全なブナと衰弱したブナの水ポテンシャルを測定したところ、衰弱したブナの水ポテンシャルは低下する傾向がみられ、水ストレスを受けていることがわかった(越地, 未発表)。この点については測定事例が少ないので、今後さらにデータを集積していく必要がある。

(4) 複合的要因

自然条件下にあるブナ林では、種々の要因が絡みあって森林衰退が起きている。ブナ林の衰退機構解明のためには、典型的な衰弱枯死事例を集積していくことも必要である。

ブナ林の衰弱枯死事例の一つとして、檜洞丸山頂付近の南斜面で約0.7haの調査区を設定し、衰弱枯死過程を調査した(越地ら, 2008; 2012)。調査開始時の1997年には、ブナ枯れの跡地に0.1haほどの大きさのギャップが形成されていたが、2007年にはギャップは2倍ほどに拡大した。さらに2010年になると、衰弱枯死区域が一層拡大した(図12)。ブナの枯死はギャップを中心にして周囲に広がっていくことがわかる。なお、本調査区域内では、1997年か

ら2010年までに発生した衰弱枯死木は31本であったが、このうちの29本がブナハバチ被害を受けており、ブナの衰弱枯死に大きい影響を及ぼしている。

ブナ枯れ跡地に大きいギャップが形成されると急激に林内環境が変化し、風やオゾンの影響を受けやすくなる。ギャップ周辺のブナは水ストレスを受けやすくなり、さらにブナハバチ被害も加わることでブナの衰弱枯死が進行する。その上、この場所はシカの採食圧により後継樹が更新できないことが草地の拡大に関係している。このように、複合的に要因が影響し、ブナが衰弱、枯死する過程を形成しているので、多角的な調査解析を継続させる必要がある。

4 まとめ

丹沢のブナ林について、大気汚染、病害虫(ブナハバチ)、水ストレスの各要因がブナ林の衰退にどのように関わっているかをみてきたが、実際にはこれらの要因が複雑に関連し合いながらブナ林の衰退現象が起きていると推測される(図13)。最近のブナ林の衰弱枯死は、高濃度オゾンや水ストレスを受けて樹勢が弱まったところにブナハバチの食害が追い打ちをかけることにより直接的なダメージを受けて進行していると考えられる。しかし、ブナハバチの大発生は1993年以後から確認されているもので、それ以前には発生の記録はない。1980年頃にみられたブナ林の衰退はブナハバチ以外の要因による可能性がある。1960年代の京浜工業地帯での高濃度の二酸化硫黄とオゾンが丹沢山地に移流することによる影響は大きかったと推測されるが、大気汚染の影響だけで衰弱枯死することはないであろう。1980年頃にみられたブナ林の衰退には病害虫の影響も想定されるが、現時点では関係資料がないため不明である。

衰退しつつあるブナ林を再生し、鬱蒼とした森林を回復させることは容易なことではない。今後もブナ林の衰退メカニズムを究明するとともに、高齢ブナの樹勢回復法、健康なブナやブナハバチに対する抵抗性ブナの増殖による活力ある森林再生法、短期間でのギャップ地の閉鎖促進法などの再生技術も平行して検討していく必要がある。

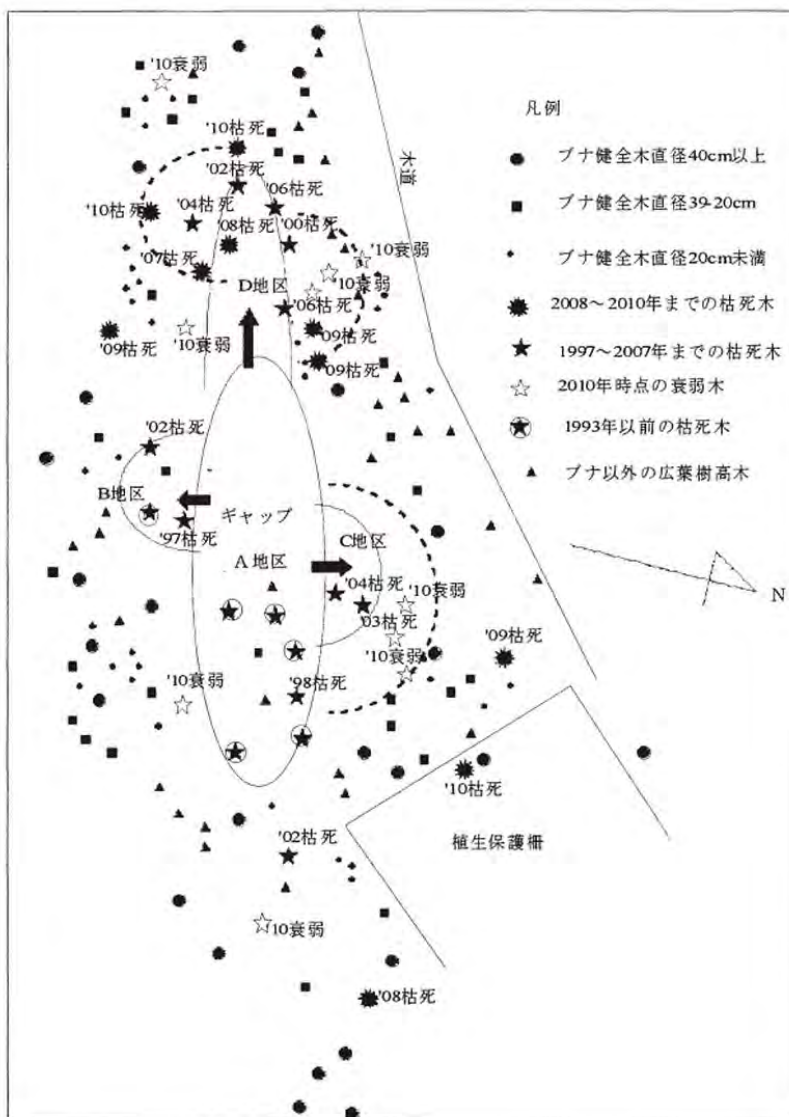


図12 固定調査地のブナの衰弱枯死分布

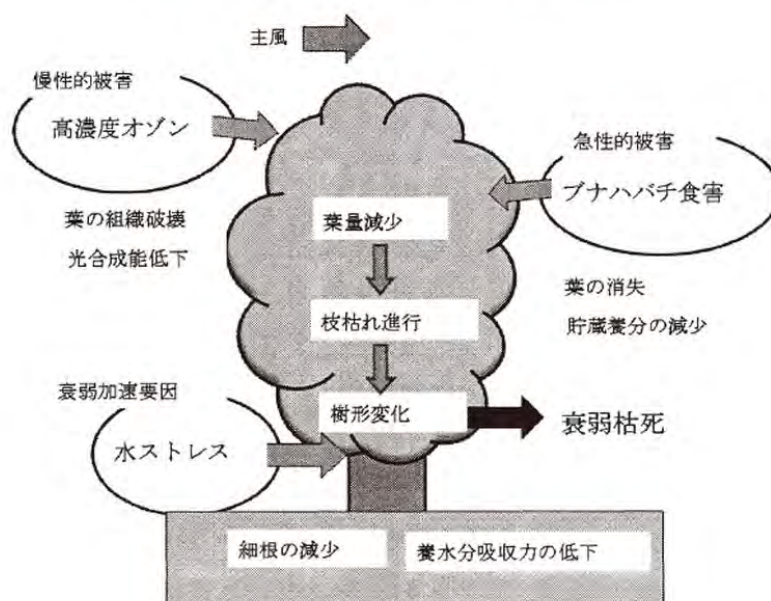


図13 ブナの衰弱枯死要因関連図

参考文献

- 相原敬次・三村春男・村松富美雄・篠崎光夫・長崎義一・関 清宣・氷見康二 (1982) 神奈川県西部地域 (西湘地域) の光化学大気汚染発生機構に関する調査研究 (1) 相模湾海風と局地汚染について. 神奈川県公害センター研究報告4: 1-13.
- 相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地 正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (Ⅱ) 神奈川県の丹沢山地における森林衰退現象. 大気環境学会誌39 (2): 29-39
- 阿相敏明・内山佳美・山根正伸・越地 正・相原敬次 (2007) 丹沢山地のブナ着葉期におけるオゾン濃度分布. 丹沢大山総合調査団 (編). 丹沢大山総合調査学術報告書. 396-399, (財) 平岡環境科学研究所.
- 井川 学 (1992) 酸性霧とその環境影響. 森林立地 34 (1): 36-39.
- 伊豆田 猛 (2006) 植物と環境ストレス. コロナ社.
- 神奈川県 (1984) かながわ環境白書 (昭和59年度). 神奈川県環境部.
- 神奈川県 (1994) 酸性雨に係る調査研究報告書. 神奈川県環境部大気保全課.
- 神奈川県 (2009) 平成20年度丹沢山地ブナ林衰退状況現地調査報告書. 神奈川県自然環境保全センター・アジア航測株式会社.
- 神奈川県 (2010) 平成21年度神奈川の大气汚染. 神奈川県環境科学センター.
- 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 (4): 206-219.
- 河野吉久・松村秀幸 (2001) 樹木への影響評価. 電中研レビュー第43号: 56-92.
- 河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳美 (2007) 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響. 丹沢大山総合調査団 (編). 丹沢大山総合調査学術報告書. 383-395, (財) 平岡環境科学研究所.
- 越地 正・鈴木 清・須賀一夫 (1996) 丹沢山地における森林衰退の調査研究 (1) ブナ、モミ等の枯損実態. 神奈川県森林研究所研究報告第22号: 7-18.
- 越地 正 (2002) 丹沢山地におけるブナハバチ大発生経過とブナの被害実態. 神奈川県自然環境保全センター研究報告第29号: 27-34.
- 越地 正・相原敬次・中島伸行・内山佳美・山根正伸・齋藤央嗣・田村 淳 (2005) 丹沢山地の主要山頂における土壌化学性の変化. 神奈川県自然環境保全センター報告第2号: 39-42.
- 越地 正・田村 淳・山根正伸 (2006) 丹沢山地におけるブナハバチの加害と影響に関するブナ年輪幅変動の解析. 神奈川県自然環境保全センター報告第3号: 11-24.
- 越地 正・谷脇 徹・田村 淳・山根正伸 (2008) 丹沢山地における2007年に大発生したブナハバチ被害とこれまでのブナの衰弱枯死過程. 神奈川県自然環境保全センター報告第5号: 3-9.
- 越地 正・谷脇 徹・相原敬次・山根正伸 (2012) 檜洞丸におけるブナハバチ大発生によるブナの衰弱枯死. 神奈川県自然環境保全センター報告第9号: 99-108.
- 鈴木 清・川村優子・新田 肇・武田 正 (1973) 大気汚染の樹木に及ぼす影響ならびに緑化樹木育成に関する研究. 神奈川県林業試験場業務報告5: 1-10.
- 鈴木 清 (1992) 神奈川県大山のモミ林枯損経緯とその周辺地域の年輪幅の変化. 神奈川県林業試験場研究報告19: 23-42.
- 武田麻由子・相原敬次 (2007) 丹沢山地の大気中オゾンがブナ苗に及ぼす影響. 大気汚染学会誌42 (2): 107-117.
- 田村 淳・越地 正・山根正伸・藤沢示弘・齋藤央嗣・内山佳美・笹川裕史 (2005) 丹沢山地におけるブナの展葉時期の違いが葉食昆虫 (ブナハバチ) の摂食に及ぼす影響. 日本森林学会関東支部大会発表論文集56: 223-224.
- 谷 晋・伴野英雄・山上 明 (2008) 丹沢山地におけるブナハバチの大量発生の再発とその食害状況について. 東海大学総合研究センター紀要 28: 55-61.
- 若松伸司・篠崎光夫 (2001) 広域大気汚染—そのメカニズムから植物への影響まで—. 裳華房.

山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2007) ブナハバチ食害によるブナ枯死とブナ林の衰退. 丹沢大山総合調査団(編). 丹沢大山総合調査学術報告書. 256-268, (財)平岡環境科学研究所.

山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明 (2007a) ブナ林の再生に向けた総合解析. 丹沢大山総合調査団(編). 丹沢大山総合調査学術報告書.

703-710, (財)平岡環境科学研究所.

山根正伸・藤沢示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・中島伸行・齋藤央嗣 (2007b) 丹沢山地における最近の気象の特徴. 丹沢大山総合調査団(編). 丹沢大山総合調査学術報告書. 375-382, (財)平岡環境科学研究所.

安田喜憲 (1985) 東西二つのブナ林の自然史と文明. 梅原猛他. ブナ帯文化. 思索社: 29-63.

丹沢山地におけるブナ衰退の時空間的特性

山根正伸*・鈴木 透**

Spatial-temporal feature of beech forests decline on the Tanzawa Mountains

Masanobu YAMANE* and Toru SUZUKI**

要 旨

山根正伸・鈴木 透：丹沢山地におけるブナ衰退の時空間的特性 神奈川県自環保セ報告9：13-21, 2012 丹沢山地の主要ブナ林における衰退進行状況を明らかにすることを目的として、主要な山頂6地区のブナ林を対象として現地踏査により衰退指標を調査した。更に、大室山から鍋割山に至る主稜線部をカバーする過去の空中写真を用いて稜線部分の土地被覆面積の変化から衰退履歴を把握した。この結果、2004年以降の5年間は顕著にブナの衰退は進行していないと考えられた。衰退履歴調査からは、ブナなどの高木の消失が原因と考えられる草地・裸地が、蛭ヶ岳から塔ノ岳にかけての標高1,450mを超える主稜線部の南向き斜面に1970年代にすでに認められ、それら消失地が拡大しながら南向き斜面で草地が増加し、2000年代まで拡大してきたことを示した。このようなブナ消失地の拡大時期は地区によって違いが見られた。このような衰退履歴を含むブナ衰退実態の分析は、これまで絞り込まれてきた衰退要因が時空間的にどのように影響してきたかの理解に役立つと考えられた。

キーワード：ブナ林、衰退実態、現地踏査、空中写真判読、時空間変化

I はじめに

丹沢山地のブナ林の衰弱・枯死（以下「衰退」）は、1990年代以降、実態や原因の解明に向けた各種の調査研究が進められている（相原ほか，2004）。

ブナ衰退の空間分布に関しては、越地ほか（1996）が丹沢のほぼ全域の冷温帯林を対象に1985年撮影の空中写真を判読し、天然林の約3割の範囲に枯死木が分布し、丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸の各山頂付近に多いこと、枯死時期は1970年から1980年頃にかけてと推定される、などを明らかにした。また、星ほか（1997）は、1996年代前半に大室山から檜洞丸、蛭ヶ岳、塔ノ岳、鍋割山を結ぶ主稜線部のブナの枯

損木の衰退状況を4段階で区分して調査し、高標高地の森林群落到に衰退が目立ち、鞍部や急傾斜地で特に衰退が著しいこと、風衝地では風上側の衰退度が大きいことを指摘した。

また、神奈川県自然環境保全センター（山根ほか，2007）は2003年から2005年にかけてマクロ（丹沢ブナ林全域；～10⁴ ha）、メソ（地区レベル；～10² ha）、サイト（林分・地点レベル；～1 ha）の3段階の景観スケールで現地踏査（以降「前回調査」）を行い、ブナ衰退の空間的特性を検討した。その結果、ブナの衰退は丹沢山地のブナ林全体に認められ、地区により進行状況が異なることを明らかにした。また、2005年時点で衰退が進んでいるのは丹沢山、

* 神奈川県自然環境保全センター研究企画部研究連携課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢657）

** 酪農学園大学農食環境学群／環境共生学類（〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582）

蛭ヶ岳、檜洞丸など、東丹沢から丹沢中央部に至る標高が1,400mを越える主稜線部であることを示した。一方、衰退が少ないのは、西丹沢の大室山、城ヶ尾峠、大棚の頭、菰釣山や、東丹沢の北側に位置する丹沢三峰・堂平などであることも示されている。また、笹川ほか(2010)は、2000年代初頭の衛星画像を解析して衰退が進む地帯でブナが衰退し草地化したと考えられる場所は20ha以上に及ぶことも示している(図1)。

このように、これまでの精力的な調査により、丹沢山地においてブナ衰退が進む場所やその立地特性が解明されてきた。しかし、ごく最近になって新たなブナ枯損原因として注目されるようになったブナハバチ(山上ほか, 2007)が、局所的に激しい葉食を繰り返し発生させており、ブナ林衰退の加速への影響が危惧され、前回調査以降のブナ衰退の進行状況の解明が求められている。加えて、これまで絞り込まれてきた衰退原因に関する検討を深め対策を探るには、衰退履歴についても詳しく分析し、ブナ衰退の時空間的な特徴を明らかにしておくことが有益と考えられる。

そこで、本研究では、前回調査の主要地点で追跡調査を行いその後の衰退の進行状況を把握するとともに、過去の空中写真を用いてブナ林の衰退履歴を明らかにすることを目的とした。

II 材料と方法

1 2008年時点のブナ衰退実態の把握

当山地のブナ林における直近の衰退状況を把握す

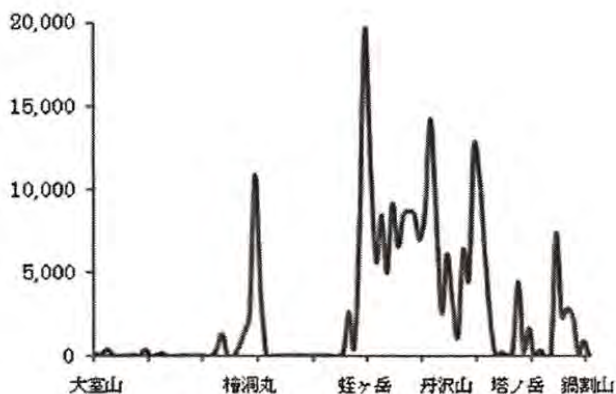


図1 2007年撮影空中写真判読による大室山山頂から鍋割山山頂までの主稜線一帯の草地・裸地分布(面積m²)

るため、筆者らが2003年から2005の前回調査で調べた主なブナ林から6地区、菰釣山、大室山、蛭ヶ岳、丹沢山、塔ノ岳、鍋割山のそれぞれ山頂付近の一带を選び、前回とほぼ同じ方法により2008年に衰退状況を調べた。

まず、前回調査で設定した100m方形調査区画をGPSによって現地確認し、各区画にそれぞれ5か所の調査地点を設定した。続いて、調査地点付近に無作為に中心点を決め、その周辺の東西南北方向に4象限を区切って、中心点から各象限の最短距離にあるブナの高木各1本、合計四本を調査対象木に選んだ。そして、調査の対象としたブナ高木のそれぞれについて、全体、枝、葉色、葉量を目視で「健全(衰退度0)」から「枯死(衰退度5)」までの6段階で衰退状況を判定した。そして、各地点で衰退度3(やや衰退)から5(枯死)に該当した調査木の本数割合を各地点の衰退進行度指標値として算出した。

なお、現地調査は、目視判定による誤差を小さくするため、ブナの落葉が始まる2～3週間ほど前の時期にあたる2008年10月10日前後の1週間に集中して行った。

2 空中写真を用いた衰退の現状と履歴の把握

ブナ衰退が進む大室山から鍋割山に至る主稜線上のブナ等高木の枯死の進行状況を把握することを目的として、半径100mの円形プロットを稜線上に中心を置いて、200m間隔で連続して設定し、各プロットで空中写真判読を行った。判読は、2007年撮影のカラー空中写真を用いてそれぞれのプロットの土地被覆状態を実体視し、幾何補正した写真上に土地被覆を図化した。この土地被覆図はシェープファイル形式で電子地図として作成し、GISの面積測定機能を用いて土地被覆分類別の面積を計測した。

判読には、デジタル写真測量と呼ばれる、PC上でオーバーラップする2枚のオルソ画像を表示し、ステレオ実体モデルを作成することで高さ情報(DSM)を得る方法を適用した。使用したソフトは、ArcGIS9.3(ESRI社)とStereo Analyst for ArcGIS(ERDAS社)である。判読した土地被覆分類は表1に示す5項目である。ここで、森林衰退の指標として草地・裸地面積割合を選び、次式により草地・裸地面積割合(%)をプロットごとに算出した。これ

は、衰退地に見られる草地・裸地は、基本的にブナなどの高木が何らかの原因で衰弱し樹冠が縮小していき、最終的には枯死して枯れ木となり、さらに年月が経過して枯れ木が朽ち、それらがまとまることでブナ林にギャップが形成されるというプロセスを経て拡大していくと考えたためである。

$$\frac{\text{草地・裸地面積}}{\text{草地・裸地面積} + \text{広葉樹林面積}} \times 100$$

さらに、衰退履歴を明らかにするため、2007年写真を用いた土地被覆状態解析と同様な方法により、表2に示す1970年代以降に撮影されたカラー空中写真を用いて、各年代の土地被覆を判読・図化した。各年代の土地被覆図は、上述した手順と同様に、それぞれ電子地図に変換してGISの機能を用いて面積測定を行い、時空間的变化を解析した。

また、先に述べた衰退状況の現地踏査を実施した大室山、檜洞丸、蛭ヶ岳、丹沢山、塔ノ岳、鍋割山の山頂付近で、高木本数の変化について、写真判読により調べた。計測では、各地区に100mの方形プロットを設定し、その中の5か所に直径20mの円形

サブプロットを設定して、空中写真を用いてサブプロット内の高木本数の変化を計測した。用いた空中写真は、1970年代と2000年代に撮影されたもので、上述の衰退履歴解析で用いたのと同じ空中写真である。この方法では、1970年代と2000年代の精度を統一するために、樹冠直径約3m以上の樹冠がはっきりしている木を高木と設定し抽出した。サンプリング地点は上述の山頂6地区とその中間地点の5地区の計11地区とした。

III 結 果

1 2008年時点の主要ブナ林の衰退状況

各地区の衰退の進行状況をみるため、各地区の調査地点で求めた衰退進行指標値を平均して平均衰退進行指標値を求めた。前回調査による同指標と比較すると、各地区とも5年間に顕著な進行は認められなかった(表3)。今回調査で、ブナの衰退が最も進んでいる地区は蛭ヶ岳の山頂付近で、調査木の約7割が衰退度3以上の高木が占めていた。しかし、2004年時点からの平均衰退進行指標値の変化は0.3ポイントとほとんど変わらなかった。このほか、前回調査で衰退が進んでいると判定された丹沢山、塔ノ岳、鍋割山山頂付近の2008年時点の平均衰退進行指標値は、7%~18%で前回調査時点より低下していた。

次に、空中写真解析による主稜線一帯の草地化の現況を図1に示した。ブナなどの高木の枯死によるものも含むと考えられる草地・裸地は、本研究で現地調査を行った6地区の山頂付近にそれぞれ多い。また、蛭ヶ岳から塔ノ岳に至る標高1,450m以上の主稜線上の南斜面にも多く、これまでブナの衰退が進んでいるとされている場所とほぼ重なっていた。

2 ブナ林衰退地の時空間変化

1970年代における各サンプリング地点の土地被覆状態は、地点により草地・裸地面積が少ない場所と多い場所が混在して分布している(図2)。蛭ヶ岳から丹沢山にかけてのサンプリング地点で草地が多く、草地の面積が10~50%の割合を占める地点が多かった。崩壊地は大室山周辺を除き全体的に分布していた。また、草地面積割合の高い場所は、蛭ヶ

表1 ブナ林衰退履歴判読に使用したオルソ画像の作成に使用したカラー空中写真の撮影年度と撮影機関

年代	撮影年	撮影機関
1970年代	1974年	国土地理院
	1977年	国土地理院
1980年代	1985年	(株)パスコ
1990年代	1993年	国土地理院

表2 ブナ林衰退履歴解析の写真判読した土地被覆分類

項 目	内 容
草地・裸地	草地もしくは裸地 (一部単木で成立する樹木を含む)
人為改変地	人為的に改変された場所
崩壊地	崩壊が発生している場所
針葉樹林	針葉樹林
広葉樹林	広葉樹林および針広混交林

表3 丹沢山地の山頂付近のブナ林における衰退調査の結果、過去2回分の衰退進行指標値の比較

地 点	平均衰退進行度 x (s.d.)		変 化 率 (ポイント)	備 考
	H20	H16		
菰 釣 山	5.0 (4.4)	12.8 (12.5)	-7.8 (12.6)	
大 室 山	3.0 (5.2)	2.8 (4.8)	0.3 (0.4)	
檜 洞 丸	—	21.0 —		H20は未調査
蛭ヶ岳	66.4 (39.9)	66.1 (46.9)	0.3 (9.2)	
丹 沢 山	15.5 (18.2)	22.2 (6.2)	-7.4 (15.2)	
塔ノ岳	18.4 (18.2)	28.3 (12.1)	-9.9 (7.2)	
鍋 割 山	7.3 (7.1)	26.3 (24.9)	-19.0 (26.8)	H16は台風直後に調査した等の理由で、衰退方向に過大評価

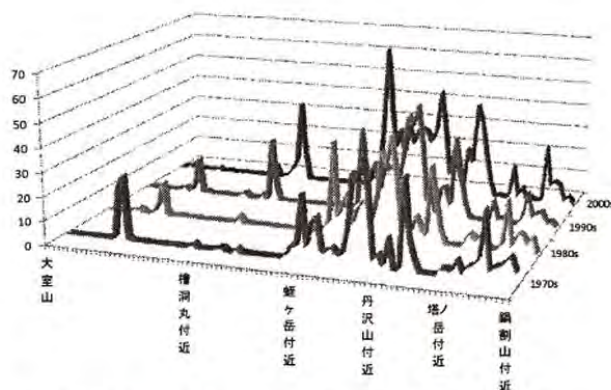


図2 1970年代から2000年代にかけての大室山山頂から鍋割山山頂までの主稜線一帯における草地及び裸地の面積割合の推移

岳から丹沢山、塔ノ岳から鍋割山にかけてであり、東丹沢にまとまって分布していた。

1980年代の土地被覆判読結果からは、1970年代と同様に、蛭ヶ岳から丹沢山にかけての稜線上で草地が多くみられた(図3)。この時期には、大室山から檜洞丸に至る一部などに草地が拡大する場所があるほか、蛭ヶ岳山頂付近などでは、すでに草地化した場所が拡大している地点が目立った。

1990年代の土地被覆判読結果からは、草地が全体に拡大するほか、檜洞丸山頂付近と蛭ヶ岳山頂から東に伸びる地点で草地の拡大が顕著であった(図3)。この傾向は、2000年代にかけても引き続き観察され、檜洞丸山頂付近、蛭ヶ岳山頂付近、丹沢山山頂付近での草地の拡大が顕著であった。一方、大室山付近などの草地が一部減少して森林化している地点があった(図3)。

サンプリング地点における各年代の草地・裸地面積割合の平均値は、1970年代、1980年代は草地裸地面積の割合はそれぞれ約6%であった。1990年代では約7%、2000年代では約9%と上昇し、草地は全体として少しずつ拡大していた。さらに、草地・裸地の増加率を見てみると、1970年代から1980年代にかけては-0.7%とほぼ変化がなかったが、1980年代から1990年代、1990年代から2000年代にはそれぞれ12.5%、14.2%の値を示しており、1990年代以降2000年代まで大きくブナ林の消失が進んでいることが確認できた。このような草地化が進んでいる場所は、おおむね標高1,450mを越える稜線部分であった(図4)。

次に、衰退が進んでいる地区での草地の拡大状況をメソスケールでみると、南向きの斜面で大きく草地が拡大したことがわかる(図5)。

最も草地拡大が顕著な地区の一つである蛭ヶ岳では、1970年代には山頂付近の山小屋用地周辺にまとまっているほかは、主稜線の南斜面に小さな島状の草地が分布している。草地の拡大は1990年代以降に顕著で、2000年代になると山頂付近の北側斜面で若干草地が拡大しているに加えて、南側斜面の草地は1970年代の島状の草地がつながる形で草地が大きく拡大している。草地の拡大はほとんどが南向き斜面である。

丹沢山の山頂付近の変化を見ると、1970年代には山小屋周辺にややまとまった草地があるほかには、ごく小面積の草地が主稜線付近に小さく分布するのみである。2000年代になると山頂の北側主稜線の南向き斜面において大きく草地が拡大している。ま

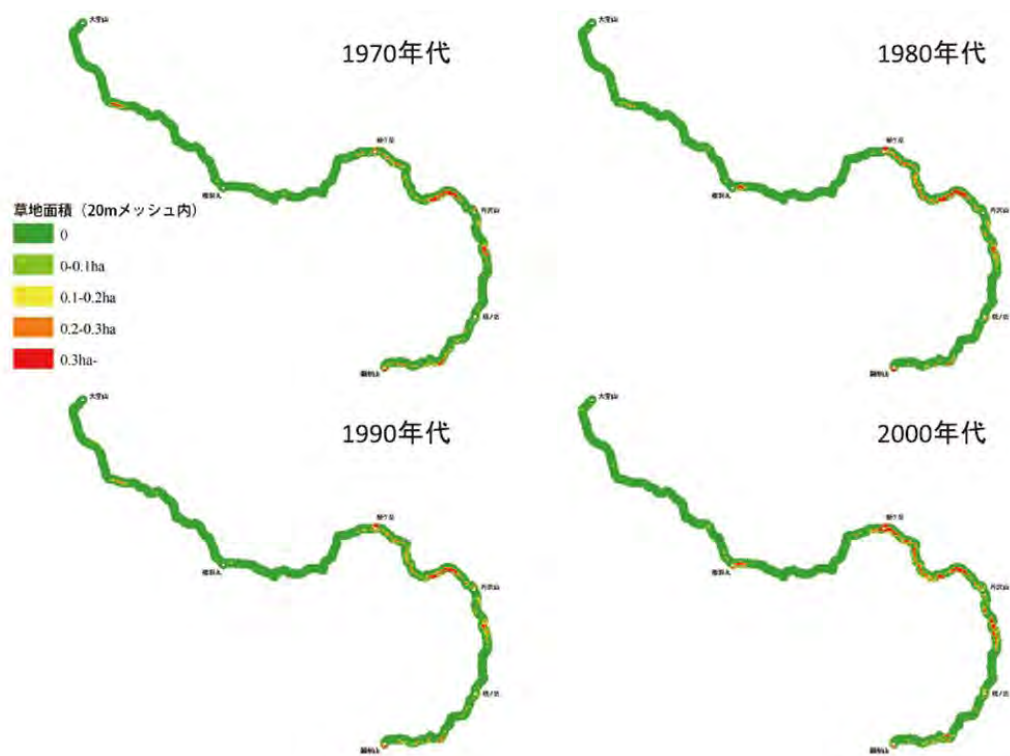


図3 1970年代から2000年代にかけての大室山山頂から鍋割山山頂までの主稜線一帯における草地および裸地の面積の変化

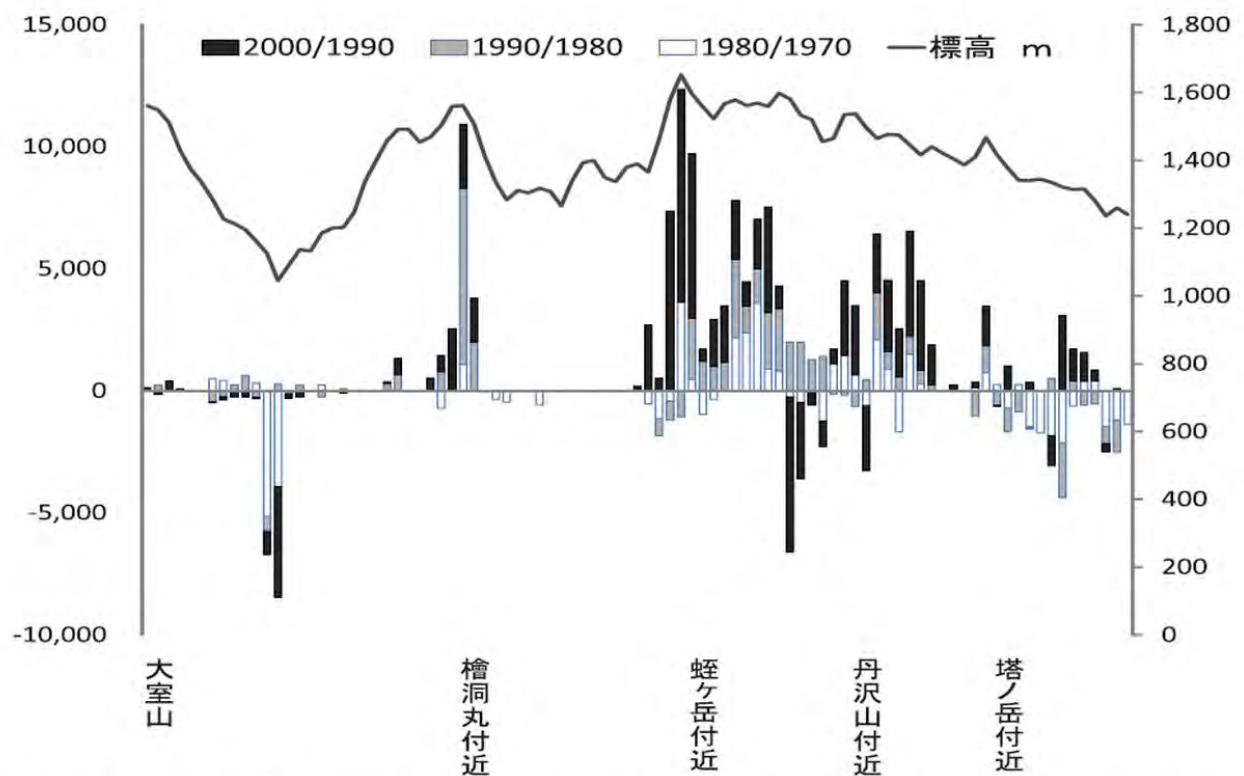


図4 1970年代から2000年代にかけての草地面積変化(左縦軸、単位 m^2)と標高(右縦軸、実線、単位m)の関係

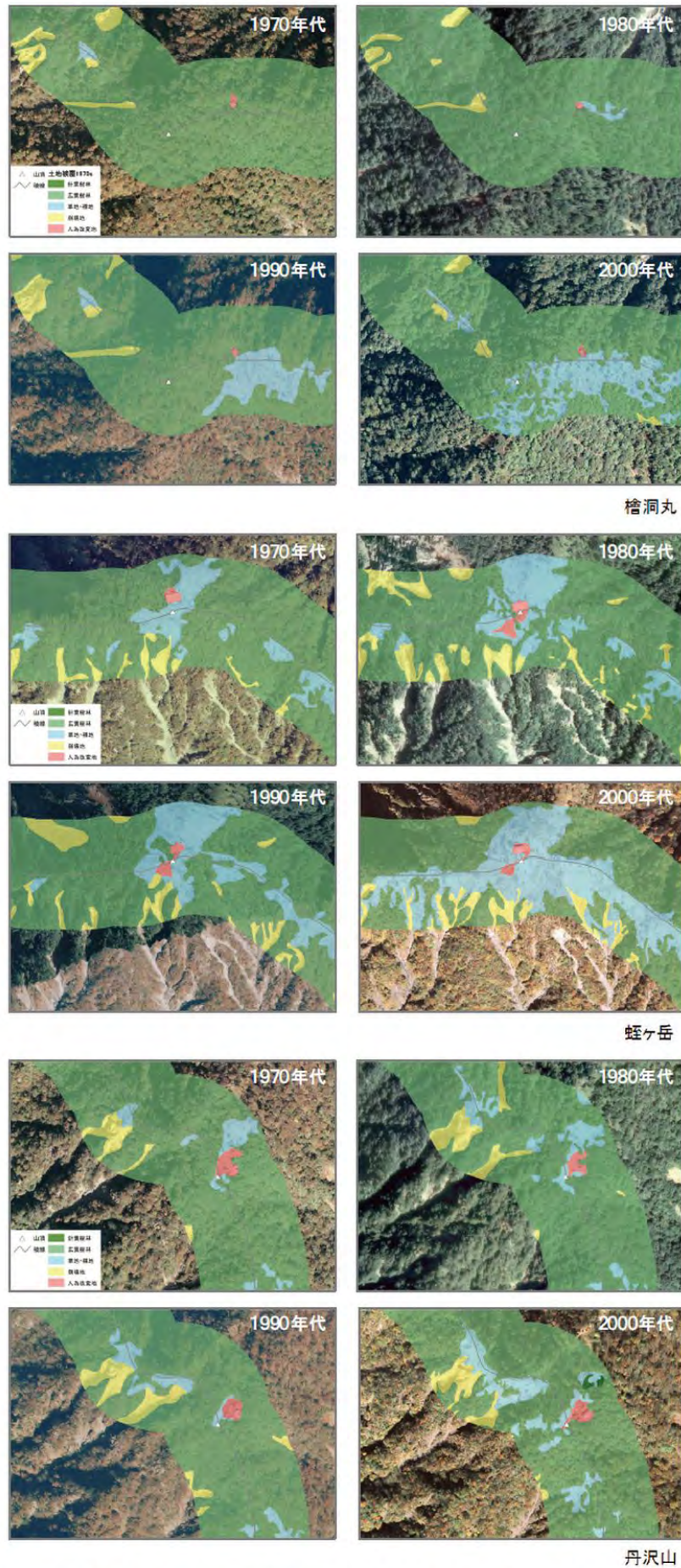


図5 檜洞丸、蛭ヶ岳、丹沢山の山頂付近における1970年代から2000年代の土地被覆状況

た、山頂から南に伸びる主稜線の南西斜面でも草地が新たに出現している。ただし、この草地の拡大は、先に見た蛭ヶ岳に比べると小さい。

檜洞丸山頂付近では、1970年代から1980年代にかけてごくわずかな草地が山頂直下の南向き斜面にしか認められなかった。しかし、1990年代に入ると、その草地が南向き斜面を中心に大きく拡大している。2000年代になると、草地はさらに南向き斜面で拡大するとともに、南東斜面でも高木が島状に残る形で草地が形成され、山頂付近の南向きから南東向き斜面にかけて全体的に草地化、疎林化している。

このように、局所的に見ても草地の拡大は、南向き斜面を中心に起こり、尾根を挟んだ反対側の北向き斜面ではあまり拡大しておらず、草地拡大に明瞭な空間的な差異が認められた。

3 主要ブナ林の高木本数の推移

次に、大室山から鍋割山までに設定した11地点のブナ林での高木本数の変化をみると、減少が大きいのは蛭ヶ岳山頂付近のブナ林、蛭ヶ岳から丹沢山に至る稜線上のブナ林、丹沢山から塔ノ岳に至る稜線上のブナ林であった(図6)。一方、高木本数の変化がわずかな地区は、檜洞丸山頂付近のブナ林、檜洞丸から蛭ヶ岳に至る稜線上のブナ林、塔ノ岳山頂付近のブナ林であった。また、鍋割山山頂付近と大室

山から檜洞丸に至る稜線上のブナ林では明瞭な高木本数の増加が認められた。

IV 丹沢山地におけるブナ衰退原因の時空間的考察

丹沢山地でのブナ衰退は、丹沢のブナ林全域から個別のブナ林までの3段階の景観スケールで、ブナが衰弱枯死してできた大小のギャップ空間が生じている森林景観と、ブナなどの高木が鬱閉しており衰退がほとんど認められない森林景観が、一定の傾向をもって空間階層的に混在している(山根ほか, 2009)。さらに、これらのブナ衰退は、オゾンなどの大気汚染物質、水ストレス、ブナハバチによる食害などの要因が関係しており(山根ほか, 2007)、景観スケールに応じて複合的に作用しながらブナの衰弱・枯死を招いてきたと考えられている(山根ほか, 2009)。

本研究では、丹沢の主稜線部のブナ林(マクロスケール)において、ブナ衰退によって草地が拡大した景観がまとまって認められたのは、檜洞丸から塔ノ岳に至る主稜線付近であった。特に、衰退による草地化が顕著な場所は、標高が1,450mを超えるブナ林に集中しており、檜洞丸山頂付近や蛭ヶ岳から丹沢山、さらには塔ノ岳に至る稜線の何か所かで衰退が顕著に進むブナ林がまとまっていた。これら衰退が顕著に進む地帯は、全般にオゾン濃度が高く、ブナの成長が低下するレベルにあることが指摘されている(阿相ほか, 2007)。

メソスケールでは、ブナなどの高木が枯死しギャップが拡大して草地が拡大している蛭ヶ岳から丹沢山などの地区では、個々のギャップは南向き斜面に偏って分布し、北向き斜面には草地化した場所が少なく、衰退が進む林分と衰退がほとんどない林分が稜線を挟んで分布するという空間的な特性を認めた。このようなマクロスケールからメソスケールレベルの衰退実態は、越地ら(1997)や星ら(1997)が指摘した衰退箇所やその立地特性とおおむね一致している。また、ブナの衰弱・枯死により生じたと考えられる草地・裸地は、1990年代半ばから2000年代半ばにかけてさらに拡大を示しており、現在のブナ消失地は1970年代以降のブナなど高木の衰弱・

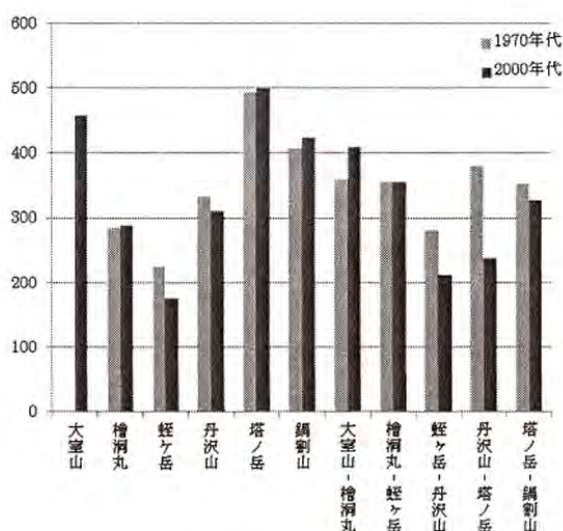


図6 主なブナ林における写真測量に基づく高木本数の測定結果

X軸はhaあたりの高木本数。大室山山頂の1970年代高木本数は未計測

枯死の累積的結果として生じていることがわかる。

メソスケールにおいて、一定の斜面方向でブナ衰退が進んでいることに関しては、風の影響が考えられる。南向き斜面では、昼間の卓越風によって、蒸散が促進され水ストレスが発生することや、葉へのオゾン接触量（ $\equiv$ オゾン濃度と風速の積）の上昇が起こることで、ブナの衰弱を加速している可能性が考えられる。当山地において高標高域の主稜線域の南向き斜面で葉へのオゾン接触量の上昇が顕著であることは、モデル解析（河野ほか，2007）からも示されている。

サイト（林分）スケールでも、ブナなど高木の樹冠の大きな縮小や枯死に起因する草地（ギャップ）が不均一に生じ、その草地が徐々に拡大し大きな草地が形作られてきたことを確認した。このような景観変化は、ブナが衰弱・枯死して小さなギャップが形成されたことがきっかけとなり、衰退原因がより強く作用することで生じたと考えることができる。すなわち、上述したように高濃度オゾンや水ストレスなどによって衰退が起こりやすい高標高域の主稜線の南向き斜面のブナ林では、ギャップがいったん形成されると、林内は風通しが良くなり単木への水ストレスあるいは葉のオゾン接触量の上昇が起こると推察される。この結果として、衰退原因がさらに強く作用して、ブナ林がより衰弱して枯死が加速するという消失地拡大メカニズムが考えられる。

また、衰退履歴解析の結果は、現在衰退が進んでいる地区でも、それぞれ異なった進み方をしてきたことを示している。蛭ヶ岳から丹沢山に至る一帯では1970年代から衰弱・枯死が大きく進んだことに加えて、1990年代から2000年代にかけても高木の枯死が持続し、草地の拡大が加速している。対して、檜洞丸山頂付近では1970年代から1980年代にかけて草地はほとんどないが、1990年代以降になると山頂付近の南向き斜面で拡大が進むなど、蛭ヶ岳などより遅くブナ林消失が進んできたことがわかる。また、檜洞丸では高木本数の減少がほとんど無いことから、ブナなどの高木は枯死には至っていないが、樹冠が大きく衰弱・縮小して地面が見通せるような疎林化、単木化が生じるブナ林衰退が進んできたことが伺える。

丹沢山地のブナの衰退要因における1990年代以

降の特徴としては、ブナハバチによる激しい食葉の発生がある（越地，2002；山上ほか，2007など）。本種によるブナへの激しい食葉は、丹沢山や蛭ヶ岳、檜洞丸など局地的に不定期に発生し、繰り返して激しい食葉を受けた個体は最終的には枯死に至ることが観察されている（山上ほか，2007；越地ほか，2008）。ブナ枯死による草地の拡大が1990年代以降顕著な場所には、本種による激しい食葉が繰り返して発生している檜洞丸山頂付近、蛭ヶ岳山頂付近、丹沢山山頂付近など（山上ほか，2007）が含まれている。これらの地区は、衰退履歴解析において1990年代から2000年代にかけて消失地が大幅に拡大した場所であり、ブナハバチが加わったことで、それ以前より衰退機構がより複雑化して、ブナの衰弱・枯死が進行していると考えられる。

丹沢のブナ林は、西丹沢のブナは直径が細く成立本数も多いのに対して、東丹沢のブナは直径が太く成立本数が少ないという林分構造上の違いがある（山根ほか，2007）。これらはブナの更新時期の違い、すなわち樹齢の違いを反映していると考えることができる。本研究で明らかにしたように、草地が拡大し、高木本数の減少が進んでいる地区は、丹沢山や蛭ヶ岳など高齢・老齢のブナが生育している地区と重なっている。一般に、高齢・老齢木は水ストレスその他の原因による衰退が進みやすい。これらの地区の南向き斜面は、前述したように高濃度オゾンや風の影響、さらにギャップ形成によるこれらの衰退原因の加速的作用が考えられ、もともと高齢・老木化のためストレス耐性の低いブナを衰弱・枯死させていることも否定できない。

以上に論考したように、時空間特性を踏まえた森林衰退実態の分析は、これまで指摘され絞込まれてきた衰退機構の解明に役立つと考えられる。今後は、個別要因の寄与や相互関係性について場所や時期による違いも考慮しながら、さらに慎重に分析していく必要がある。

V 引用文献

- 相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地 正
(2004) 森林衰退の現状と取り組み(Ⅱ) 神奈川
県の丹沢山地における樹木衰退現象. 大気環境

- 学会誌, 39(2):29-39.
- 阿相敏明・内山佳美・山根正伸・越地 正・相原敬次 (2007) 丹沢山地のブナ着葉期におけるオゾン濃度分布. 396-399. 丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.
- 星 直斗・山本詠子・吉川菊葉・川村美岐・持田幸良・遠山三樹夫 (1977) 自然林の現状とその保護, 丹沢山地の自然林. 丹沢大山自然環境総合調査報告書. 175-257, 神奈川県環境部編, 389pp, 神奈川県, 横浜.
- 河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳 (2007) 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響. 383-395. 丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.
- 越地 正 (2002) 丹沢山地におけるブナハバチ大発生の経過とブナの被害実態. 神奈川県自然環境保全センター研究報告, 29:27-3.
- 越地 正・鈴木 清・須賀一夫 (1996) 丹沢山地における森林衰退の調査研究(1)ブナ、モミ等の枯損実態, 神奈川県森林研究所研究報告, 22:7-18.
- 越地 正・谷脇 徹・田村 淳・山根正伸 (2008) 丹沢山地における2007年に大発生したブナハバチ被害とこれまでのブナの衰弱枯死過程、神奈川県自然環境保全センター報告, 5:3-9.
- 笹川裕史・伊藤祥子・鈴木 透・谷脇 徹・プアムイハウリ・山根正伸・清水英幸 (2010) リモートセンシングデータを用いた丹沢山地ブナクラス域における植生状況の時系列変化解析. 日本森林学会大会発表データベース121:39.
- 山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2007) ブナハバチ食害によるブナ枯死とブナ林の衰退. 256-268. 丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.
- 山根正伸・藤澤示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・齋藤央嗣 (2007) 丹沢山地のブナ林の現況—林分構造と衰退状況—. 479-484. 丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.
- 山根正伸・田村 淳・内山佳美・笹川裕史 (2009) 丹沢山地におけるブナ林衰退の衰退要因の空間階層的関係の検討. 景観生態学13(1・2):5-13.

神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン曝露と水欠乏の複合影響の実験的解析

伊藤祥子*・笹川裕史**・相原敬次***・清水英幸*

Experimental analyses of the combined influence
of ozone exposure and water shortage on beech seedlings
from Tanzawa, Kanagawa, Japan

Shoko ITO*, Hiroshi SASAKAWA**, Keiji AIHARA*** and Hideyuki SHIMIZU*

要 旨

伊藤祥子・笹川裕史・相原敬次・清水英幸：神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン曝露と水欠乏の複合影響の実験的解析 神奈川県自環保セ報告9:23-32, 2012 神奈川県丹沢産の3年生ブナ苗を用いて、環境制御室でオゾン曝露と水欠乏処理による慢性影響の検討を行った。3段階のオゾン濃度を設定した曝露チャンバーに3段階の灌水処理区を設け、ポットに植栽した苗木を12週間育成した。その結果、オゾン濃度が増加するにしたがって、植物の個体および各器官の乾物生長は抑制された。また、灌水処理区を比較すると、水欠乏が強くなるにしたがって、植物の生長は抑制された。相対生長率や純同化率も、オゾン濃度や水欠乏が大きくなるにしたがい、減少傾向を示した。結果として12週間のオゾンと水欠乏の単独および複合処理によってブナの個体乾重は抑制され、光合成速度などの生理活性の低下が確認された。また、両要因は相加的に作用していた。

キーワード：可視障害、環境制御室、乾物生長、蒸散、光合成

I はじめに

神奈川県の北西部に位置する丹沢山地では、1970年代からブナ林の衰退が報告され、様々な調査研究が進められてきた（相原ら，2004；丹沢大山総合調査団，2007など）。これらの調査研究によって、衰退要因としてオゾン（ O_3 ）や水欠乏が指摘されたが、ブナの衰弱や枯死との直接的な結びつきに関する現地での調査結果は少なく、水ストレスとブナの衰弱との関係については、 O_3 ストレスとの複合影響

も含めて、さらに調査・研究を進めていくことが課題とされた（山根ら，2007 a）。

これまで、いくつかの農作物や樹木で O_3 と水ストレスの複合影響について検討されているが、植物の種類、年齢、曝露期間や濃度によって様々な結果が示されている（Harkov & Brennan, 1980；Greitner *et al.*, 1994；米倉ら，2000；Shimizu & Feng, 2007）。また、 O_3 感受性には種間差異や系統間差異などもあり（伊豆田ら，2001）、複合影響のメカニズムに関しては未だ解明されていない。ブナについては、

* 国立環境研究所地域環境研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

** 国立環境研究所地域環境研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

（現所属：一般社団法人日本森林技術協会（〒102-0085 東京都千代田区六番地7））

*** 神奈川県自然環境保全センター研究企画部研究連携課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢657）

Yonekura *et al.* (2001) や Watanabe *et al.* (2005) が、 O_3 と水ストレスに関する複合実験を行っているが、主として葉の生理活性に着目しており、個体生長への影響および生長解析によるメカニズムの解明に関しては明確には示されていない。

そこで、本研究では、神奈川県丹沢産のブナ苗を用いて、環境制御室において長期間の O_3 曝露と水欠乏処理を行い、これらストレスのブナ (*Fagus crenata*) への慢性影響について、乾物生長や生理生態的応答の観点からその影響解析を行った。

II 実験材料と方法

冬季に平均樹高 50 cm ほどの神奈川県産のブナ苗 (3 年生) を、赤玉土などを加えたポット (12 cm ϕ $\times$ 20 cm H) に 1 本ずつ植栽し、野外において適宜灌水しながら育成した。その後、ブナ苗 (3 年生) の展葉がほぼ完了した時期 (5 月中旬) から 12 週間、実験を行った。この時期は、丹沢などの野外でもブナが伸長、展葉して生育する時期である (田村, 2007)。実験開始前に十分に灌水した後、自然光中型環境制御室 (2 m $\times$ 2 m $\times$ 2 m: 小糸工業 S 型) にブナ苗を移動し、育成実験を行った。

実験には 3 台の環境制御室を用いた。各環境制御室の O_3 濃度は、日平均 70 ppb (夜間 10 時間 40 ppb / 5 時間移行期 / 昼間 4 時間 120 ppb / 5 時間移行期)、日平均 50 ppb (夜間 10 時間 20 ppb / 5 時間移

行期 / 昼間 4 時間 100 ppb / 5 時間移行期) および 0 ppb (O_3 無処理) に設定した。 O_3 無処理以外の処理区の濃度は、丹沢地域 (犬越路・檜洞丸) の平均濃度 (42 ppb) より 7 割あるいは 2 割程度高い濃度である (河野ら, 2007)。各環境制御室の実験期間中の O_3 曝露総量を AOT-40 (40 ppb を越える 1 時間平均 O_3 濃度の積算値) で示すと、各々約 108 ppm $\cdot$ h、約 78 ppm $\cdot$ h、0 ppm $\cdot$ h である。全ての環境制御室は、気温: 25 / 15 $^{\circ}$ C (昼 / 夜)、相対湿度: 65 / 70% (昼 / 夜) に設定した。

各環境制御室で 3 つの灌水处理区を設定した。すなわち、3 日に一度 250 ml (以下、wet 処理とする)、175 ml (以下、semi-dry 処理とする) あるいは 125 ml (以下、dry 処理とする) の灌水を行った。各水处理区にはそれぞれ 12 個体のブナ苗を供試した。各環境制御室内には合計 36 ポットをランダムに配置し、定期的に位置を変えて、環境制御室内の位置による影響の偏りを防いだ。wet 処理は、丹沢山地など太平洋側のブナ林域のブナ生長期にあたる 6 月～8 月の降水量に相当し (村井ら, 1991; Yoshidome *et al.*, 2004; 山根ら, 2007 b)、wet 処理の灌水量の約 70% が semi-dry 処理、50% が dry 処理に相当する。実験期間中の土壌の水ポテンシャルは、pF メータ (大起理化工業 DIK-3060) を用いて連続計測を行った (図 1)。

実験開始および終了時に、可視障害率 (個体当たりの総葉面積に占める障害面積の割合: 目視判定に

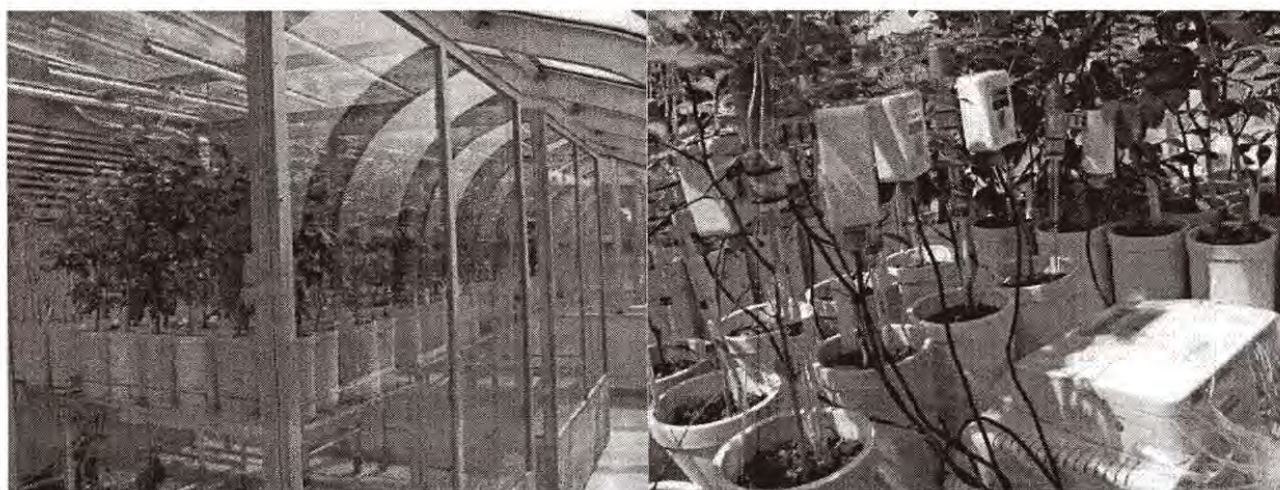


図 1 環境制御室でのオゾン曝露 $\times$ 水欠乏複合実験

A: 自然光型環境制御室でのブナ苗木の育成、B: pF メータによる水ポテンシャルの連続計測

より個体毎に5%刻みで記録)と葉緑素量(SPAD値:SPAD-502,(株)コニカミノルタセンシング社製)を計測後、植物を収穫した。葉面積(3100型,Li-Cor. Corp. USA)を計測後、根、茎、葉に分けて通風型乾燥器(90℃)で最低3日間乾燥させ、乾重を計測した(AB204-S, Mettler Instruments A. G., Switzerland)。さらに実験開始6週および12週間後に蒸散量と光合成速度の計測を行った。蒸散量は上皿天秤重量法(メトラー・トレド, SB32001 Delta Range)により個体毎に計測し、光合成速度は、CIRAS-1(PP SYSTEMS社製)を用いて、各個体2葉ずつ計測した(図2)。生長量に関する統計処理には、Turkeyの多重比較を用いた。相対生長率(Relative Growth Rate、以下RGR)および純同化率(Net Assimilation Rate、以下NAR)は以下の式を用いて計算した(Evans, 1972)。

$$RGR = 1/W \cdot dW/dt = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

$$NAR = 1/W \cdot dW/dt = [(W_2 - W_1) / (A_2 - A_1)] * [(\ln A_2 - \ln A_1) / (t_2 - t_1)]$$

ここで W_1 、 W_2 および A_1 、 A_2 は、各々、 t_1 (実験開始)、 t_2 (実験終了)時における個体乾重および葉面積を示す。葉面積比(Leaf Area Ratio、以下LAR)は個体乾重に対する葉面積の比率、葉重比(Leaf Weight Ratio、以下LWR)は個体乾重に対する葉乾重の比率、比葉面積(Specific Leaf Area、以下SLA)は葉乾重当たりの葉面積から算出した。地下部/地上部比(Root/Shoot Ratio、以下R/S ratio)は

地上部バイオマス(葉乾重+茎乾重)に対する地下部バイオマス(根乾重)の比率である。

III 結果と考察

1 可視障害への影響

実験終了時(12週間後)の苗木を図3に示す。O₃濃度が増加するにしたがい、個体の葉の付き方が疎らになっている。同時期の葉身の可視障害の状態を図4に示す。O₃に曝露していないブナの葉身がほぼ緑色であったのに対して、O₃に曝露したブナの葉身には白緑色や褐色の斑点が観察される場合があった。このような可視障害はO₃曝露個体にのみ認められ、特にO₃濃度70ppb曝露区で多かった。このような障害は、個葉の位置にあまり関係無く全体的に発症した。

複合実験12週間後の各処理区の可視障害率を図5に示す。全水処理区において、O₃濃度0ppb処理区の植物には可視障害が認められず、O₃濃度が高くなるに従い、植物の可視障害率は高くなった。また、O₃曝露区で比較すると、水欠乏が強い、つまり水ストレスが大きい処理区ほど、可視障害率が増加する傾向が認められた。これまでに、O₃は植物葉に可視障害を発現させることが報告されている(Ashmore *et al.*, 1980; Mortensen, 1992; 大黒ら, 1993; Sawada & Kohno, 2009など)。特に樹木に関して、Shimizu *et al.* (1993)は100ppbO₃に3~4週

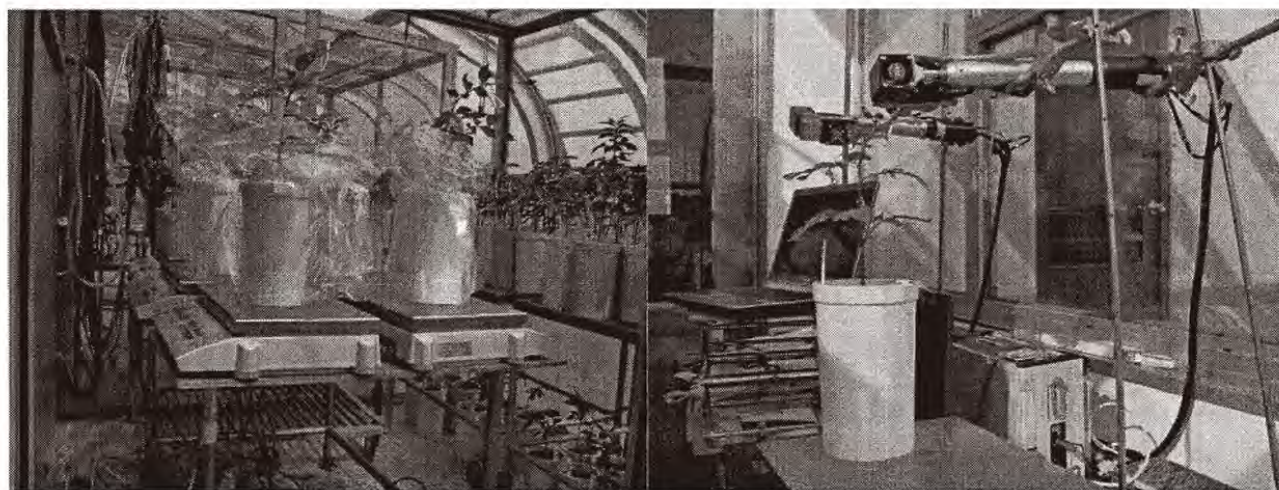


図2 複合実験中のブナ苗の生理活性の計測

A: 上皿天秤を用いた重量法での蒸散量計測、B: CIRAS-1による純光合成速度の計測

間曝露したポプラの交雑種 (*Populus maximowiczii* × *Populus plantierensis*) やヤマブキ (*Kerria japonica*) の葉に可視障害が発現したことを報告している。また、ヨーロッパブナ (*Fagus sylvatica*) とスイカズラ科の1種 *Viburnum lantana* の可視障害の発現割合は O_3 に曝露すると高まり (Novaka *et al.*, 2008)、シラカンバ (*Betula platyphylla* var. *japonica*) とケヤキ (*Zelkova serrata*) を外気の2～3倍の O_3 に曝すと白色斑点や黄色化などの可視障害が発現し、早期落

葉が引き起こされることが報告されている (松村ら, 1998)。今回の実験においても O_3 濃度が高いほど、発現する可視障害の割合が増加したことから、 O_3 濃度の増加は、丹沢産ブナにも可視障害を発現させる可能性があると考えられた。

2 生長への影響

O_3 曝露や水欠乏を与えない対照区 (0 ppb O_3 - wet 処理区) を基準としたときの、実験終了時 (12



図3 複合実験開始後12週目のブナの苗木

左から (3 個体ずつ)、0、50、70ppbの O_3 曝露処理
各組の左からwet、semi-dry、dryの水欠乏処理



図4 複合実験開始後12週目のブナ葉身

A : 0 ppb O_3 - wet 処理、B : 0 ppb O_3 - dry 処理、C : 70 ppb O_3 - wet 処理、D : 70 ppb O_3 - dry 処理

週間後)の各処理区の個体乾重(%)を図6に示す。O₃曝露区を比較するとO₃濃度が増加するにしたがって個体乾重は減少した。また、灌水処理区を比較すると、水欠乏が増加するにしたがって、個体乾重は減少した。各器官の乾重は個体乾重とほぼ同様に変動した。

O₃濃度が最も高く、水ストレスが最も強い処理区(70ppbO₃-dry処理区)のブナの個体乾重は、対照区に比較して約40%減少した。wet処理の間でO₃濃度の影響を比較すると、50ppbO₃は約25%、70ppbO₃は約34%、個体乾重を減少させた。一方、

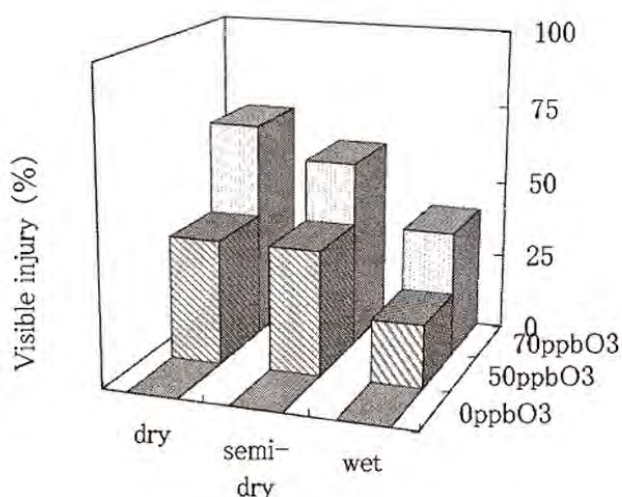


図5 複合実験開始後12週目のブナ葉の可視障害率
各処理区の個体の平均値(実験材料と方法を参照)

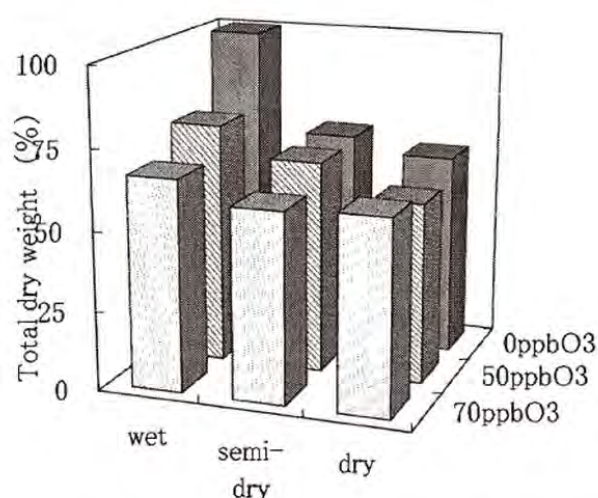


図6 複合実験開始後12週目のブナの個体乾重

各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

semi-dry処理やdry処理では、wet処理に比べ、O₃濃度処理間の個体乾重の差はそれほど顕著ではなく、対照区と比べると押し並べて低かった。

Tseng *et al.* (1988) は、水ストレスをかけたモミ(*Abies fraseri*)をO₃に曝露した結果、水ストレスは生長を低下させたが、O₃の単独影響やO₃と水ストレスの有意な交互作用は認められなかったと報告している。今回の実験では、丹沢産ブナ苗の乾物生長に対して、O₃曝露と水欠乏という環境ストレスが各々単独で生長を抑制したが、統計的にはそれらの交互作用は認められなかった。したがって、O₃と水ストレスは、丹沢産のブナに対して相加的に影響すると考えられた。

次に、生長解析を行い(Evans, 1972)、RGR、NAR、LAR、LWR、SLAなど、いくつかの生理的、形態的パラメータに分けて、ブナへのO₃曝露と水欠乏の影響を比較解析した。最初に、対照区(0ppbO₃-wet処理区)を基準としたときの、各処理区のRGR(%)を図7に示す。個体乾重の変動と同様に、O₃濃度が増加するにしたがい、また水欠乏が増加するにしたがい、RGRは減少傾向を示した。ただし、70ppbO₃処理における水ストレスの影響、およびdry処理におけるO₃曝露の影響については明確ではなかった。

RGRは、生理的特性をあらわす純同化率(NAR)と形態的特性をあらわす葉面積比(LAR)の積とし

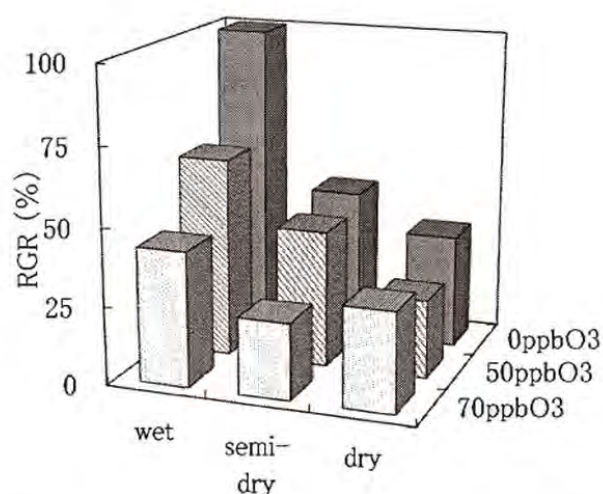


図7 複合実験開始後12週目のブナの相対生長率(RGR)

各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

て表すことができる。さらにLARは、葉の重さの割合を表す葉重比 (LWR) と葉の薄さを表す比葉面積 (SLA) の積として表すことができる。まず、NARとLARについて、対照区を基準としたときの各処理区の値 (%) を図8に示す。NARは、O₃濃度が増加するにしがいい、また水ストレスが増加するにしがいい減少傾向を示した。ただし、70ppbO₃処理区における水ストレスの影響、およびdry処理区におけるO₃の影響については明確ではなかった。これらの傾向はRGRの結果と類似していた。一方、LARはどの処理区においてもほぼ一定で、O₃や水ストレスによる顕著な影響は認められなかった。

LWRとSLAについて、対照区を基準としたときの各処理区の値 (%) を図9に示す。両パラメータとも顕著な変動は示さなかったが、LWRは、O₃濃度

や水ストレスが増加するにしがいい、僅かに減少傾向を示した。一方、SLAは、O₃濃度や水ストレスが増加するにしがいい、僅かに増加し、葉が薄くなる傾向を示唆した。

さらに、対照区を基準としたときのR/S ratioとSPADの値を図10に示す。R/S ratioとSPADともに、O₃または水ストレスが増加しても顕著な変動傾向は認められず、O₃濃度や水欠乏による明確な影響を確認できなかった。

O₃によって様々な生長パラメータが影響を受けるが、O₃によるNARの低下は、多くの農作物などで確認されており (Shimizu *et al.*, 1981; 伊豆田ら, 1988; 米倉ら, 2000)、O₃による純光合成速度の低下が示唆されている。今回の実験においても、O₃曝露や水欠乏による丹沢産ブナ苗の生長の低下傾向

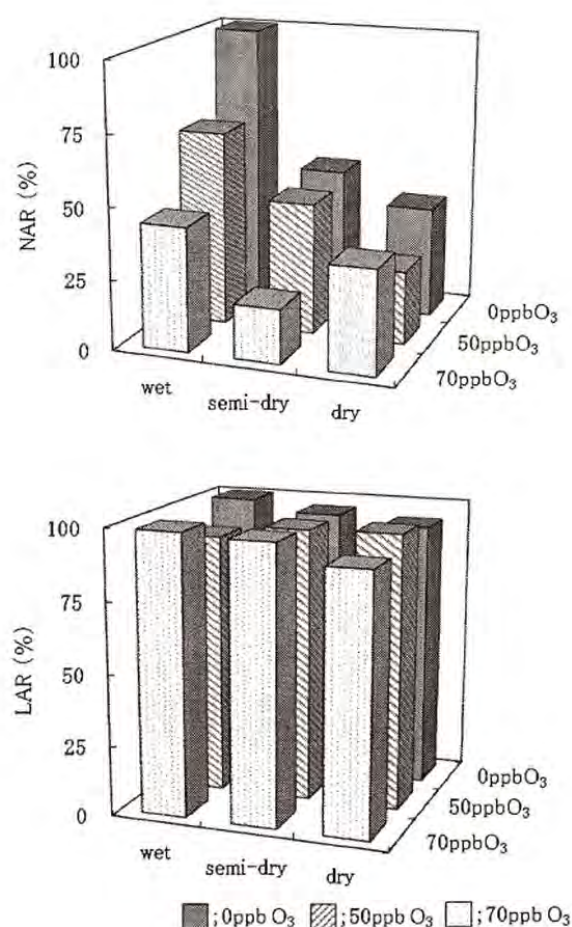


図8 複合実験開始後12週目のブナの純同化率(NAR)と葉面積比(LAR)

上段: NAR、下段: LAR
各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

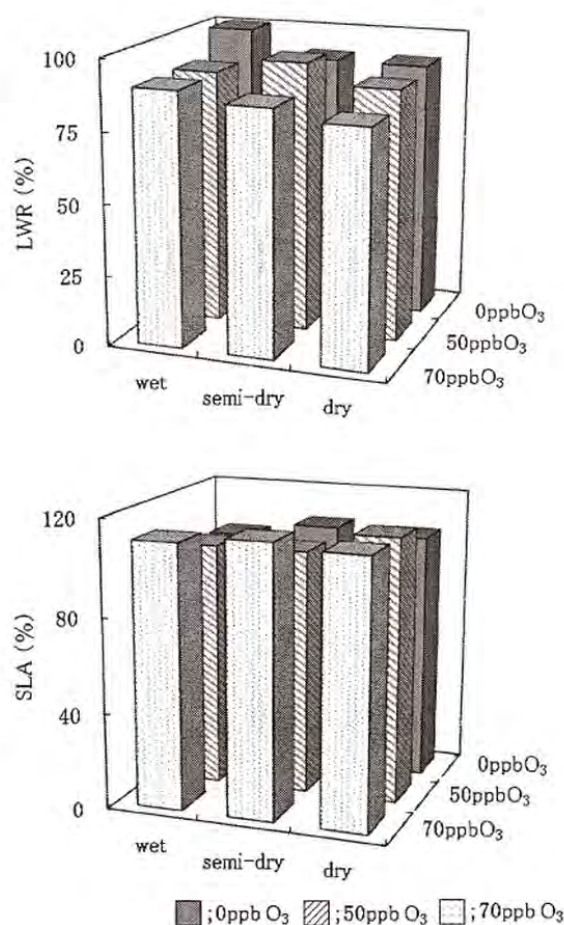


図9 複合実験開始後12週目のブナの葉重比(LWR)と比葉面積(SLA)

上段: LWR、下段: SLA
各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

は、光合成の低下による可能性が考えられた。

そこで、光合成速度と蒸散速度について計測した結果を、対照区を基準としたときの各処理区の値(%)として図11に示す。O₃濃度が増加するにしたがい、また水ストレスが増加するにしたがい、純光合成速度は低下する傾向を示した。これらの変動は、生長解析で認めた純同化率とほぼ同じ傾向であった。一方、蒸散速度も、O₃濃度が増加するにしたがい、また水ストレスが増加するにしたがい、低下する傾向を認めたが、純光合成速度に対する影響ほど顕著ではなかった。O₃曝露や水欠乏によって引き起こされるブナの純光合成速度の低下には、気孔閉鎖以外の要因が関与している可能性が示唆された。

Rechi (1983) は、O₃曝露によって、ポプラ交雑種 (*Populus maximowiczii* × *Populus trichocarpa*) の最大純光合成速度が低下し、通常の老化による純光合成速度の低下が早まったことを報告している。Yang *et al.* (1983) は、このような影響が、O₃濃度の上昇に伴って、著しくなることも報告している。さらに、水ストレスとO₃の両ストレスを与えたポプラ (*Populus tremuloides*) では、個体当たりの純光合成速度が相加的に低下したことが報告されている (Greitner *et al.*, 1994)。今回の実験でも、O₃と水ストレスは、丹沢産ブナ苗の光合成速度を低下させており、丹沢のブナもO₃と水ストレスの影響で光合成活性ひいては生育が抑制されていることが示唆された。

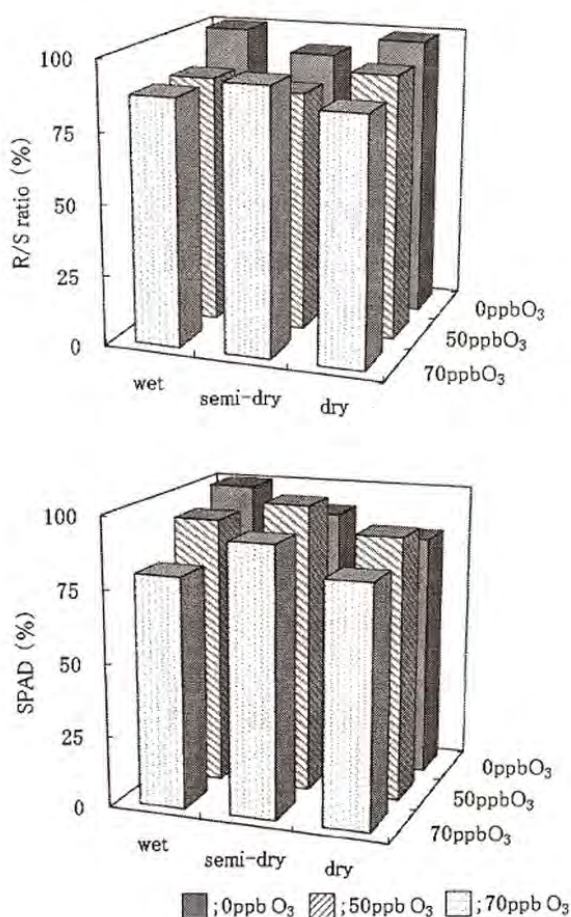


図10 複合実験開始後12週目のブナの地下部/地上部比(R/S ratio)と葉緑素量 (SPAD値)

上段：R/S ratio、下段：SPAD値
各処理区の値は0 ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

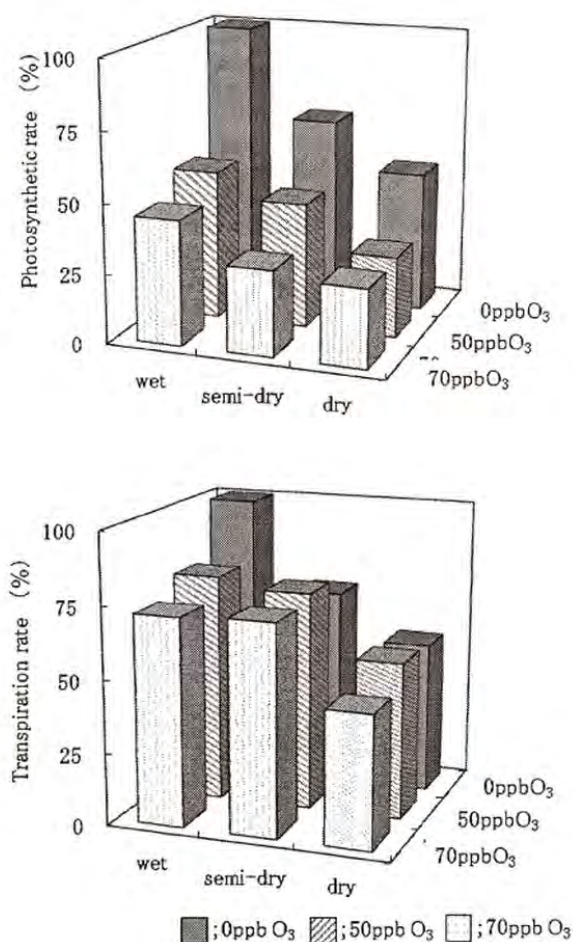


図11 複合実験開始後12週目のブナの光合成と蒸散

上段：純光合成速度、下段：蒸散速度
各処理区の値は0 ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

IV 結 論

これまで、O₃曝露や水欠乏がブナに影響を及ぼすことが報告されているが(Yonekura *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2005; Yamaguchi *et al.*, 2007)、今回ほぼ3か月間の長期複合実験においても、O₃曝露や水欠乏によって、可視障害が増加し、個体乾重、純同化率、さらに光合成速度などが減少することが確認された。つまり、O₃や水ストレスはブナの光合成に影響を及ぼすことにより、生長抑制という慢性影響を引き起こすことが推測された。また、O₃と水ストレスの両要因は相加的に影響すると考えられた。

今後、ブナの出葉・展葉時期(野外でO₃濃度が高くなる春季)を含む全生育期間におけるO₃曝露および水ストレスの複合実験を行い、各時期における生理活性への影響を詳細に解析することにより、丹沢山地におけるブナ林の衰退メカニズムの解明やその保全対策にも貢献する所存である。

V 謝 辞

本研究を行うにあたり、神奈川県山林種苗協同組合にブナの苗木購入の便宜を図っていただいた。また、株式会社川上農場には、国立環境研究所でのブナ苗木の栽培育成管理を、住友精化株式会社、小糸電工(株)、計測器サービス株式会社には環境制御室やO₃ガス曝露の調整をしていただいた。また、国立環境研究所の鈴木貞子さん、後藤友加里さん、加藤まどかさん、下田恵子さん、中崎知香子さんには、実験中の計測等で協力していただいた。以上の方々並びにこれまでご指導とご協力を賜ったすべての方々に心から感謝します。

VI 参考文献

- 相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み(Ⅱ)神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象. 大気環境学会誌 39 (2) : 29-39.
- Ashmore M.R., Bell J.N.B., Dalpra C., Runeckles V.C. (1980) Visible injury to crop species by ozone in the United Kingdom. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological 21 (3) : 209-215.
- Evans G. C. (1972) The quantitative analysis of plant growth. 734pp. William Clowes and Sons Ltd., London.
- Greitner C., Pell E. J., Winner W. E. (1994) Analysis of aspen foliage exposed to multiple stresses: ozone, nitrogen deficiency and drought. New Phytol 127 : 579-589.
- Harkov R., Brennan E. (1980) The influence of soil fertility and water stress on the ozone response of hybrid poplar trees. Phytopathology 70 (10) : 991-994.
- 伊豆田猛・船田 周・大橋 毅・三宅 博・戸塚 績 (1988) 異なる温度条件下におけるハツカダイコンの生長に対するオゾンの影響. 大気汚染学会誌 23 : 209-217.
- 伊豆田猛・松村秀幸・河野吉久・清水英幸 (2001) 樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究. 大気環境学会誌 36 (2) : 60-77.
- 河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳美 (2007) ブナ林の立地環境調査(大気) 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響. 丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書 : 48-62.
- 松村秀幸・小林卓也・河野吉久 (1998) スギ、ウラジロモミ、シラカンバ、ケヤキ苗の乾物生長とガス交換速度に対するオゾンと人工酸性雨の単独および複合影響. 大気環境学会誌 33 (1) : 16-35.
- Mortensen L. M. (1992) Effects of ozone on growth of seven grass and one clover species. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science 42 (4) : 235-239.
- 村井宏・山谷孝一・片岡寛純・由井正敏 (1991) ブナ林の自然環境と保全. 399pp. ソフトサイエンス社.
- Novak K., Schaub M., Fuhrer J., Skelly J. M., Freya B., Krauch N. (2008) Ozone effects on visible foliar injury and growth of *Fagus sylvatica* and *Viburnum lantana* seedlings grown in monoculture

- or in mixture. *Environmental and Experimental Botany* 62 (3) : 212-220.
- 大黒俊哉・根本正之 野内勇 (1993) 人工酸性雨とオゾンの曝露が数種雑草および農作物の可視被害の発現に及ぼす影響. *雑草研究* 38 (3) : 223-229.
- Reich Peter B. (1983) Effects of low concentrations of O₃ on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves. *Plant Physiol.* 73 : 291-296.
- Sawada H. Kohno Y. (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biology* 11 : 70-75.
- Shimizu H., Feng Y.W. (2007) Ozone and/or water stresses could have influenced the *Betula ermanii* Cham. forest decline observed at Oku-Nikko, Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 128, 109-119.
- Shimizu H., Fujinuma Y., Kubota K., Totsuka T., Omasa K. (1993) Effects of low concentrations of ozone (O₃) on the growth of several woody plants. *J. Agric. Meteorol.* 48 (5) : 723-726.
- Shimizu H., Motohashi S., Iwaki H., Furukawa A., Totsuka T. (1981) Effects of exposures to ozone on the growth of sunflower plants. *Environ. Control. Biol.* 19(4) : 137-147
- 田村 淳 (2007) ブナの生理・生態調査 丹沢山地におけるブナのフェノロジー. 87-88. 平成13～平成18年度丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書. 神奈川県自然環境保全センター研究部編, 111pp, 神奈川県自然環境保全センター, 神奈川.
- 丹沢大山総合調査団 (2007) 丹沢大山総合調査学術報告書. 794pp. 丹沢大山総合調査実行委員会監修, (財)平岡環境科学研究所.
- Tseng Elizabeth C., Seiler John R., Chevone Boris I. (1988) Effects of ozone and water stress on greenhouse-grown fraser fir seedling growth and physiology. *Environmental and Experimental Botany* 28 (1) : 37-41.
- Watanabe M., Yonekura T., Honada Y., Yoshidome M., Nakaji T., Izuta T. (2005) Effects of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf antioxidative systems of *Fagus crenata* Seedlings. *J. Agric. Meteorol.* 60 (6) : 105-1108.
- Yamaguchi M., Watanabe M., Iwasaki M., Tabe C., Matsumura H., Kohno Y., Izuta, T. (2007) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O₃ under different nitrogen loads. *Trees-Structure and Function* 21 (6) : 707-718.
- 山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明 (2007 a) ブナ林の衰退機構と再生の方向. 104-111. 平成13～平成18年度丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書. 神奈川県自然環境保全センター研究部編, 111pp, 神奈川県自然環境保全センター, 神奈川.
- 山根正伸・藤沢示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・中嶋伸行・齋藤央嗣 (2007 b) I 丹沢山地における最近の気象の特徴. 375-382. 丹沢大山総合学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 794pp, 財団法人平岡環境科学研究所, 神奈川.
- Yang Y. S., Skelly J. M., Chevone B. I., Birch J. B. (1983) Effects of long-term ozone exposure on photosynthesis and dark respiration of eastern white pine. *Environ. Sci. Technol.* 17 (6) : 371-373
- Yonekura T., Honda Y., Okasanen E., Yoshidome m., Watanabe M., Funada R., Koike T., Izuta T (2001) The influences of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf gas exchange rates, leaf ultrastructural characteristics and annual ring width of *Fagus crenata* seedlings. *J. Society for Atmospheric Environment* 36 (6) : 333-351.
- 米倉哲志・大嶋香緒里・服部誠・伊豆田猛 (2000) ダイズの成長, 収量, 子実成分および発芽率に対するオゾンと土壌水分ストレスの単独および複合影響. *大気環境学会誌* 35 (1) : 36-50.
- Yoshidome M., Watanabe M., Honda Y., Ogiwara I., Izuta T. (2004) Carry-over effects of ozone and water stress on leaf phenological characteristics and bud frost hardiness of *Fagus crenata* seedlings. *Trees-Structure and Function* 18 (5) : 581-588.

Summary

In the Tanzawa Mountains (Kanagawa, Japan) the decline of beech forests has been observed since 1980. Various studies were conducted thereafter, and ozone (O₃) and water shortage in addition to beech sawfly were suspected as major factors causing the decline. We examined the growth and ecophysiological activities of beech seedlings using environment-controlled chambers to clarify the chronic damages of O₃ and water stress singly or in combination. These seedlings were exposed to 70, 50 or 0 ppbO₃ with different water treatment of 1200, 840 or 600 mm in terms of growing period precipitation for 12 weeks. The dry weight growth of seedlings decreased with increasing O₃ concentration or water shortage, which suppressed the NAR as similar to the RGR. In the present experiments, some ecophysiological activities and biomass production of beech seedlings were influenced by increasing O₃ concentration and/or water shortage, while these two factors acted additively according to statistical analysis. We concluded that O₃ and water shortage were strongly related to causing the decline of beech forests observed in the Tanzawa Mountains.

Key words: environment-controlled chamber, growth, photosynthesis, transpiration, visible injury

神奈川県丹沢地域の大気環境

斎藤正彦*・若松伸司*・岡崎友紀代*・國元浩平*・松隈大亮**・

下村佳史***・相原敬次****・山根正伸****

Atmospheric Environment in the Tanzawa Mountainous Areas of Kanagawa Prefecture

Masahiko SAITO*, Shinji WAKAMATSU*, Yukiyo OKAZAKI*, Kohehi KUNIMOTO*,
Daisuke MATSUKUMA**, Yoshifumi SHIMOMURA***, Kenji AIHARA****
and Masanobu YAMANE****

要 旨

斎藤正彦・若松伸司・岡崎友紀代・國元浩平・松隈大亮・下村佳史・相原敬次・山根正伸：神奈川県丹沢地域の大気環境 神奈川県自保セ報9:33-43, 2012 本研究では、丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目指し、気象と大気汚染モニタリングデータの解析、オゾンと気象の立体分布観測や数値シミュレーションによる解析を行った。気象のトレンド解析から、神奈川県では冬が短くなり夏が長くなる傾向があることが分かった。AOT40解析からは、丹沢山地の夜間におけるAOT40の増加が顕著であることが明らかとなった。後方流跡線解析からは、西丹沢犬越路で100ppb以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方から輸送されたオゾンであることが明らかになった。また、東海地域からの輸送も認められた。オゾンゾンデ観測解析からは、春季には、上空の幅広い高度範囲に東アジアを起源とするオゾンの層が存在すること、夏季には高度1,000m付近にオゾンのピークが観測され、海風、陸風によるオゾンの輸送があること等が明らかとなった。数値シミュレーション解析からは、水平濃度分布やゾンデ観測と概ね同様の立体分布パターンの状況が再現でき、これを基に生成機構解明がなされた。

キーワード：オゾン、光化学オキシダント、AOT40、オゾンゾンデ観測、数値シミュレーション

I はじめに

これまで神奈川県では丹沢山地のブナ林の衰退に係わる調査を行い、その衰退原因のひとつとして大

気汚染質のオゾンの影響が指摘されている（阿相ら, 1995；若松ら, 2001；相原ら, 2004；山根ら, 2007）。Sudo *et al.* (2008) は、丹沢山地の地形を考慮した流体シミュレーションを行い、地形特有の風

*愛媛大学農学部大気環境科学研究室（〒790-8566 愛媛県松山市噂味3丁目5番7号）

**九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻大気環境モデリング研究室
（〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地）

***NTTデータ東海（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-17-21）

****神奈川県自然環境保全センター研究企画部研究連携課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢657）

速とオゾン濃度のフラックスから、ブナ林衰退のメカニズムを提案している。しかし、オゾンは、都市域で排出された窒素酸化物と揮発性有機化合物により生成される汚染質であり、広域的な範囲で生成されるものである。すでに、現状のオゾン濃度はブナ林の衰退が懸念されているレベルに達している(河野, 2001) こともあり、広域的なオゾンの動態を説明する必要がある。

そのため、本研究ではオゾンを中心に大気環境の視点から丹沢山地におけるブナ衰退の要因解明を目指し、気象や大気質の長期変動解析、後方流跡線によるオゾン輸送経路の解析、気象・オゾン濃度の立体観測、気象・オゾン濃度の数値シミュレーション解析を行った。

II 気象のトレンド解析

丹沢山地周辺の東京都、神奈川県、山梨県、静岡県における過去30年間のアメダスデータより気象の長期変動(トレンド)を解析し、その変動がブナ林衰退をもたらすとされているシカやブナハバチの生態系に影響を及ぼすかを検討した。

東京都、神奈川県、山梨県、静岡県にある40地点のアメダスデータを1978年から2007年の30年間に、年間と月別の日最高気温、平均、日最低気温の上昇率を図1に示す(下村ら, 2009)。年間の上昇率の大きさは、日最低気温、平均、日最高気温とも同程度で、約0.04℃/年であった。月別にみると、2月と3月、9月と10月に気温上昇が大きい。具体的には、2月と9月では、日最高気温で約0.07℃/年、平均で約0.06℃/年、日最低気温で約0.05℃/年であった。この気温上昇の要因として、都市部ではヒートアイランドが考えられる(三上, 2005)。日本の季節変化について解析した高橋(2009)によると、ここ30年間で秋雨の始まりが半月程度遅れる傾向があることが分かり、丹沢山地においても秋雨の遅れが気温上昇に影響していると推測される。全体的な傾向として、2月と9月が最も気温上昇が大きいことから、冬が早く終わり、夏が長くなることが明らかになった。

特に冬季の気温が上昇していることは、ブナの生育環境に悪影響を及ぼす可能性が高い。ブナは寒冷

な地域を好むので、温暖で夏季の降水量が少ない地域には、あまり分布していない。丹沢山地においても標高800 mよりも高い地域にブナ林が多く生育している。

このように気温の上昇は、ブナ林の生態系に直接的な影響を与えるのみならず、ニホンジカやブナハバチの生態にも影響を及ぼし、食害の影響が加速される可能性も考えられる。

また、気温上昇により人為起源、自然起源の大気汚染原因物質の発生量も増加する。これと共にオゾンや二次生成粒子(PM_{2.5})生成をもたらす反応性も増大するので、これらの複合的な影響が懸念される。

III 大気質の長期的変化の解析

大気汚染常時監視測定結果を用いて、全国平均と神奈川県平均の大気質(光化学オキシダント、窒素酸化物、非メタン炭化水素)の長期変化を調べた。丹沢山地のブナ着葉期(4~9月)のオゾン生成の前駆物質である窒素酸化物(NO_x)と非メタン炭化水素(NMHC)について、1990~2010年度までの経年変化を図2に示す(國元ら, 2012)。窒素酸化物も非メタン炭化水素ともに、全国平均より神奈川

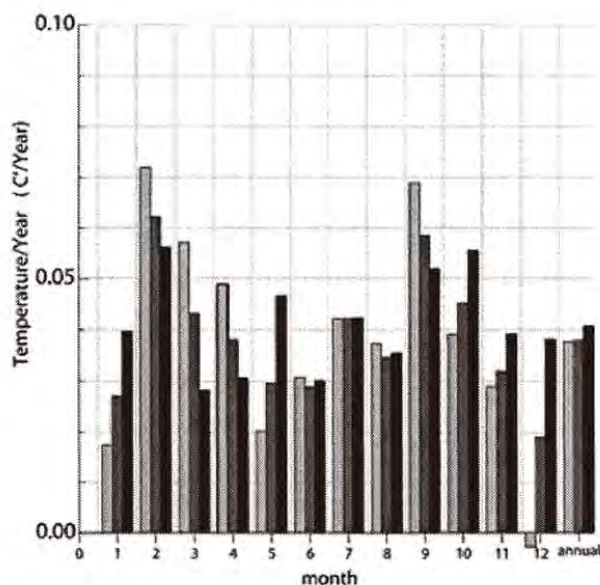


図1 過去30年間のアメダスデータによる日最高気温、平均、日最低気温の年間上昇率(月別と年平均)

(月別および年平均は、それぞれ3本の棒グラフから構成されている。左側は日最高気温、中央は平均、右側は日最低気温を示す。)

県の方が高い。非メタン炭化水素は1990年代前半に急激に低下しているが、窒素酸化物は2000年頃から急激に低下している。窒素酸化物の低下は、自動車排気ガス規制によるものであると推測される。

神奈川県および全国の1990～2010年度までの光化学オキシダント(O_x 、ほとんどがオゾン)の経年変化を図3に示す。図2に示した通り、オゾン生成の前駆物質である窒素酸化物と非メタン炭化水素が経年的に減少しているが、光化学オキシダントは全国も神奈川県も増加傾向にある。

また、ポテンシャルオゾン^注(PO)と二酸化窒素(NO_2)の経年変化を図3に示す。神奈川県の光化学オキシダントは全国平均より低い値を示しているが、ポテンシャルオゾンは全国平均より高い値を示している。神奈川県では、全国平均よりも二酸化窒素が高いため、ポテンシャルオゾンが全国平均より高くなったと考えられる。ポテンシャルオゾンが高いことは、全国平均に比べ光化学反応によって生成したオゾンが多いことを示している。

非メタン炭化水素と窒素酸化物の比について、1990～2010年度までの経年変化を図4に示す。この比が6～8の範囲にあると80ppbを超える光化学オキシダントが確認されやすくなるとされている。窒素酸化物が急激に低下し始めた2000年頃から非メタン炭化水素と窒素酸化物の比は上昇傾向に転じている。前駆物質の削減により非メタン炭化水素

と窒素酸化物の比率が変わり、光化学オキシダントを発生させやすい環境が生み出されている。

日中(6:00～18:00)と夜間(18:00～6:00)におけるAOT40^注(Accumulate exposure Over a Threshold of 40ppb、伊豆田ら、1997)の神奈川県平均(1990～2010)と犬越路(2004～2010)の経年変化を図5に示す(國元ら、2010)。各年の平均値は、ブナの着葉期の4～9月の半年間の値から算出した。日中、夜間ともに、犬越路は県平均より高い値を示している。特に夜間の値は県平均より3～4倍程度高い値になっており、夜間のオゾンが高いことによる植物への影響が懸念される(國元ら、2012; 國元、2012)。

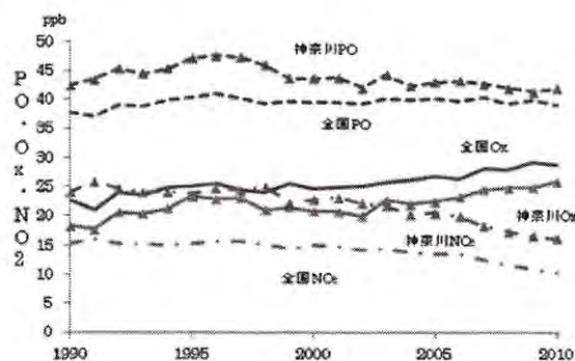


図3 光化学オキシダント(O_x)、ポテンシャルオゾン(PO)、二酸化窒素(NO_2)の経年変化(全国平均、神奈川県平均)

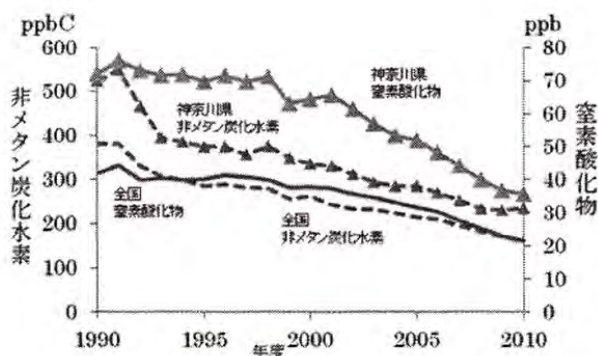


図2 窒素酸化物と非メタン炭化水素の経年変化(全国平均、神奈川県平均)

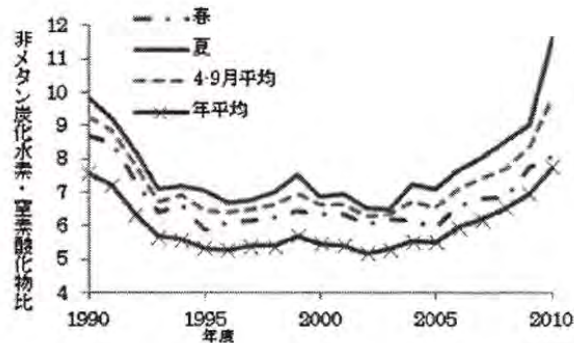


図4 非メタン炭化水素と窒素酸化物の比の経年変化

注) ポテンシャルオゾンとは、光化学反応によって生成したオゾンは、 $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ の反応により、NOを消失する反応で一部オゾンが消費されるといわれており、この消失分を補正したもの(環境省、2007)。

Ⅳ 後方流跡線によるオゾン輸送経路の解析

丹沢山地の上空の空気塊がどのような経路を経て移動してきたかを調べるために、後方流跡線解析^{注)}を実施した。ここで用いた流跡線解析は、国立環境研究所地球環境研究センター (NIES - CGER ; <http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html>) で開発された METEX (Meteorological Data Explorer) を使用した。計算方法は三次元法 (Kinematic) を用い、入力する気象データは気象庁の GPV (Grid Point Value) の MSM (Meso Scale Model) データ (格子系、地上 : $0.05^\circ \times 0.0625^\circ$ 、気圧面 : $0.1^\circ \times 0.125^\circ$) を使用した。到達点は、北緯 139.083° 、東経 35.489° の西丹沢犬越路局 (以下、犬越路局と呼ぶ) の海拔 $1,200\text{ m}$ とした。解析対象日は、2007 年と 2008 年の 2 年間のうち着葉期の 4 月から 9 月の間に犬越路局のオゾン濃度が 100 ppb 以上の日 (23 日間) とした。

後方流跡線解析 (METEX) の結果、犬越路局に到達する経路として大きく 2 パターンがあることが分かった (図 6)。一つは、東海・関西方面から犬越路局へ輸送されてきたパターン (3 例)、もう一つは、関東方面から輸送されたパターン (20 例) である。犬越路局で 100 ppb 以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方からの輸送されたものであることが後方流跡線解析 (METEX) から分かった (松隈ら, 2009 ; 松隈ら, 2010)。

Ⅴ 気象・オゾン濃度の立体観測

丹沢山地におけるオゾンと気象要素 (風向風速、温湿度) の立体分布を把握するために、2009 年から 2011 年に 24 回のオゾンゾンデ観測を実施した。ゾンデ観測は、自由気球に観測機器を取り付けて 300 m/分 で飛揚し、上昇中に外気と高度を測定することにより、各要素の高度分布を観測するものである (岡崎ら, 2010 ; 山下ら, 2011)。

気象要素を観測する場合は、気象ゾンデ (明星電気社製 RS-06G 型 GPS ラジオゾンデ) を用い、オゾン濃度観測をする場合は、気象ゾンデにオゾン濃度のセンサー (EN-SCI 社製 1 Z 型) を取り付けて観測する。オゾン濃度は、ヨウ化カリウムとオゾンとの化学反応で生じる電流から算出するものであり、ECC (Electrochemical Concentration Cell) 型と呼ばれている。本観測機材は、気象庁をはじめこれまで広く利用されている。

2009 年春季 (3 月) のゾンデ観測 (図 7) では、高度 $1,000\text{ m}$ から $5,000\text{ m}$ の広い範囲にオゾンのピークが見られ、このパターンは愛媛県松山市でのオゾン観測と類似しており、東アジアを起源と考えられる対流圏起源のオゾンの層が存在すると考えられる。2009 年 8 月と 2010 年 7 月の夏季は $1,000\text{ m}$ 付近にオゾンのシャープなピークが認められる (図 7)。特に 2010 年の場合には、 500 m 、 $1,000\text{ m}$ 付近

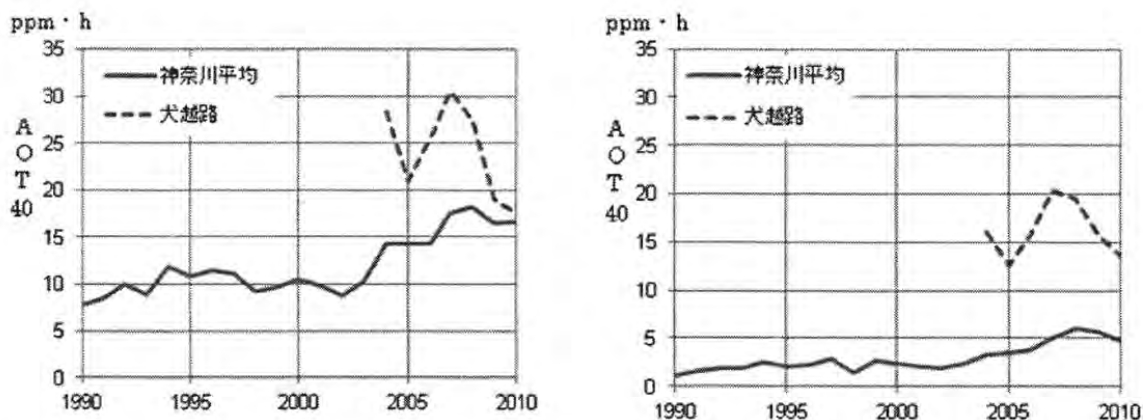


図5 日中(左図; 6:00~18:00)と夜間(右図; 18:00~6:00)のAOT40の経年変化(神奈川県平均、犬越路局)

注) AOT40とは、オゾン濃度が 40 ppb を超えた時の 40 ppb 超過濃度の期間積算量であり、植物への影響を示す指標として使われている。

注) 後方流跡線解析とは、到達地点にある空気塊がどのような経路を経て輸送されてきたかを調べるため、過去の気象データを使って時間を遡って移動経路を調べる方法である。

と上空8,000から9,000 mにピークを持つ複雑な構造になっていた。上空の500 m、1,000 m付近のピークは海陸風循環の影響によるものと考えられ、下層500 mのピークは南寄りの風である海風領域、上層1,000 mのピークは北寄りの風である陸風領域に対応している。

VI 気象・オゾン濃度の 数値シミュレーション

丹沢山地の上空の気象やオゾン濃度を解析するために、コンピュータによる数値シミュレーションを実施した(斎藤ら, 2009; 斎藤ら, 2011)。本シミュレーションでは、気象を再現するモデルとしてMM 5 (UCAR, 2008) を用い、オゾン濃度を再現する大気

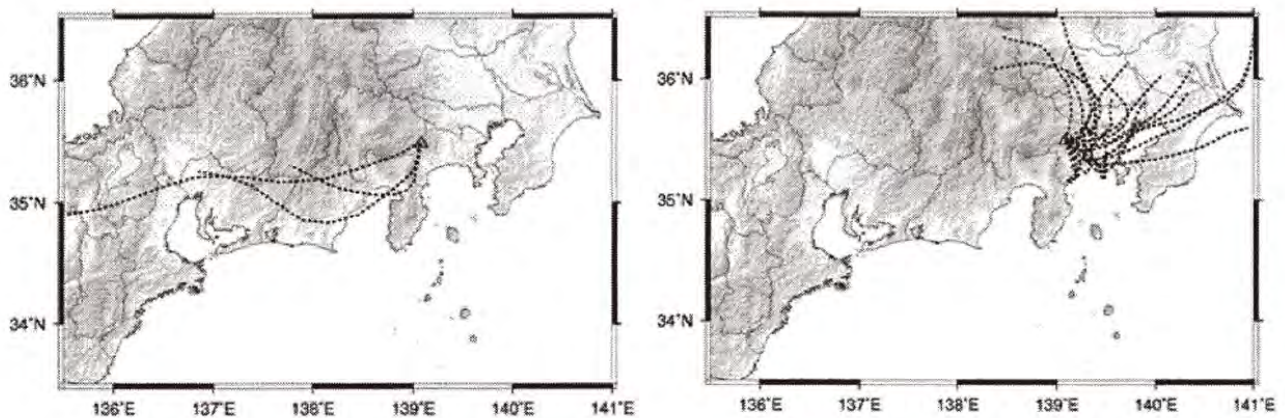


図6 METEXによる後方流跡線解析の結果

(左図：東海・関東方面からの輸送された3例、右図：関東方面から輸送された20例)

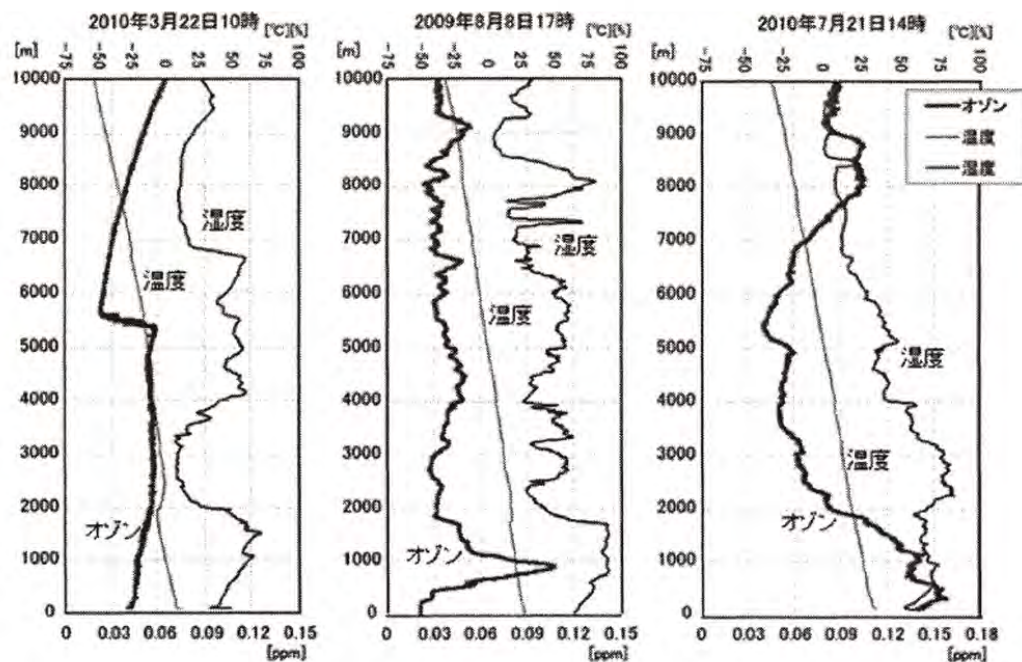


図7 オゾン濃度、温湿度の鉛直分布

(左図：2010年3月22日10時放球、中央の図：2009年8月8日17時放球、右図：2010年7月14時放球)

質モデルとしてCMAQ (Byun *et al.*, 2006)を用いた。東アジアの影響を考慮するために、図8に示した領域を設定した。大気質モデル (CMAQ) へ入力する気象データは、気象モデル (MM 5) の計算結果を用いた。気象モデル、大気質モデルともに、本州域の初期・境界条件は東アジア域の結果を取り込み、関東域の初期・境界条件は本州域の結果を取り込んでいる。排出量データは、東アジア域については国立環境研究所 (2007) のデータを、また本州域、関東域については Kannari *et al.* (2007) を用いた。

丹沢山地の周辺の測定局 (座間) における地上の風向風速の観測結果 (神奈川県, 2011) と気象モデル (MM 5) の結果を図9に示す (斎藤ら, 2011)。解析期間は、2010年7月20日9時から7月26日9時までである。午前中は風が弱い、午後風が強まり南寄りの風 (海風) になっている。夜は再び風は弱まっている。光化学スモッグ注意報は、2010年7月21日から24日まで発令されており、日中は比較的風速が弱く、気温が高い典型的なオゾン高濃度気象条件になっている。

気象ゾンデ観測の鉛直方向の温位^{注)}・比湿^{注)}、風向風速分布 (2010年7月21日10時) を図10に示す

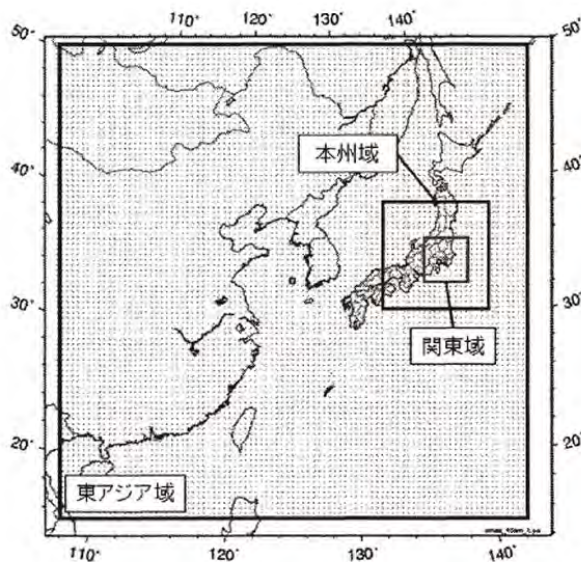


図8 計算領域

(東アジア域: 45km計算格子間隔、本州域: 15km計算格子間隔、関東域: 5km計算格子間隔)

(斎藤ら, 2011)。温位分布より、大気境界層の高さ (図中: PBL 高さ) は、日中の対流により 1,800 m 付近まで達している。比湿は、大気境界層内ではほぼ一定で、大気境界層より上空では急速に減少している。また、風向風速についてみると、大気境界層より上空では北寄りの風が卓越しているが、大気境界内では風が弱く、丹沢山地の山頂付近の 1,500 m では風速は 2 m/s 以下になっている。これらのことから、気象モデル (MM 5) の結果は、温位、比湿、風向風速ともに変化傾向を再現していると評価される。

次に、地上のオゾン濃度の測定値 (神奈川県, 2011) と大気質モデル (CMAQ) の結果を比較した (斎藤ら, 2011)。測定局は、丹沢山地の代表局として犬越路局、また、丹沢山地周辺の一般環境大気測定局の代表局として座間局とした (図11)。犬越路局や座間局も、大気質モデル (CMAQ) により良く再現されているが、特に犬越路局の夜間オゾン濃度が下がらない現象も良く捉えている。

一般に、多くの測定局では日中オゾン濃度が高く、夜間低い山型の日変化を示すが、丹沢山地でのオゾン濃度は夜間下がらない日変化を示している (図11)。そこで、丹沢山地では何故、オゾン濃度が日変化をしないかを調べるためにプロセス解析を実施した。プロセス解析とは、オゾン濃度の時間変化を、移流項、拡散項、化学反応、湿性・乾性沈着に分解し、各々の大きさを求めるものであり、大気質

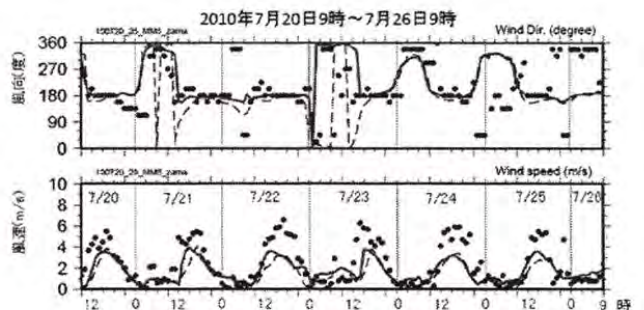


図9 風向風速の時刻変化 (座間)

(点は実測、実線は気象モデル 5 km 計算格子間隔、破線は気象モデル 15 km 計算格子間隔の結果)

注) 温位とは、空気塊を標準気圧 (1,000hPa) まで断熱的に移動させたときの温度を表す。

乾いた大気中では 100m 高くなると約 1℃ 低くなりますが、この効果を差し引いた気温が温位に相当する。

注) 比湿とは、湿潤空気の質量 (1 kg) 当たりの水蒸気の質量 (kg または g) を表す。

モデル (CMAQ) の機能のひとつである。犬越路局における夜間のオゾン濃度の時間変化の内訳を調べた結果、丹沢山地では夜間風が弱く移流項や拡散項が小さく、化学反応、湿性・乾性沈着がほとんど無視できる大きさであったため、日中のオゾン濃度がそのまま保たれたためであることが分かった。

大気質モデル (CMAQ) による地上オゾンの水平濃度分布の時刻変化を図12に示す。また、オゾン濃度の測定結果は、測定位置の○に濃度スケールに対応した色を付けた。解析対象日は、神奈川県が光化

学スモッグ注意報を発令した2010年7月21日とした。日出とともに都市圏を中心にオゾン濃度が増加し、14時から16時にかけて東京都を中心に高濃度になっている。丹沢山地は、この広域な高濃度オゾン域の端に位置している。この時刻別水平濃度分布より、オゾンは広域的に発生する汚染物質であることが分かる。

2010年7月21日10時におけるオゾン濃度の鉛直分布の観測結果と大気質モデル (CMAQ) 結果を図13に示す (斎藤ら, 2011)。オゾンゾンデ観測結果

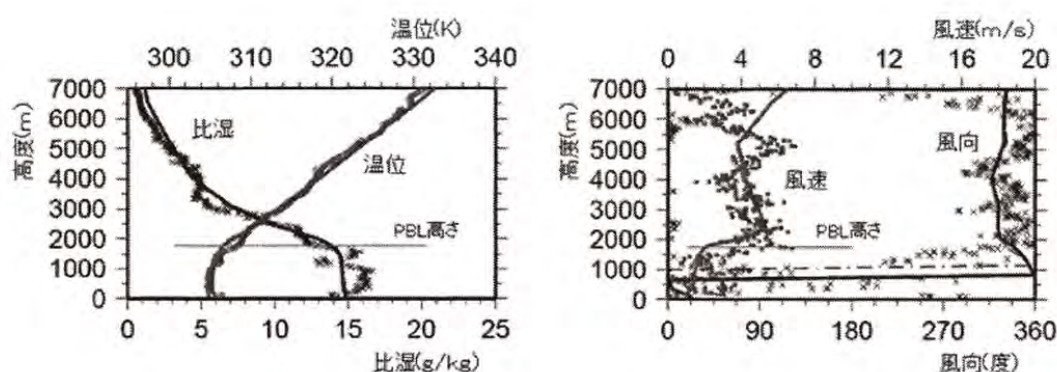


図10 鉛直方向の温位・比湿、風向風速分布(2010年7月21日10時)

(点は実測、実線は気象モデル5km計算格子間隔、破線は気象モデル15km計算格子間隔の結果)

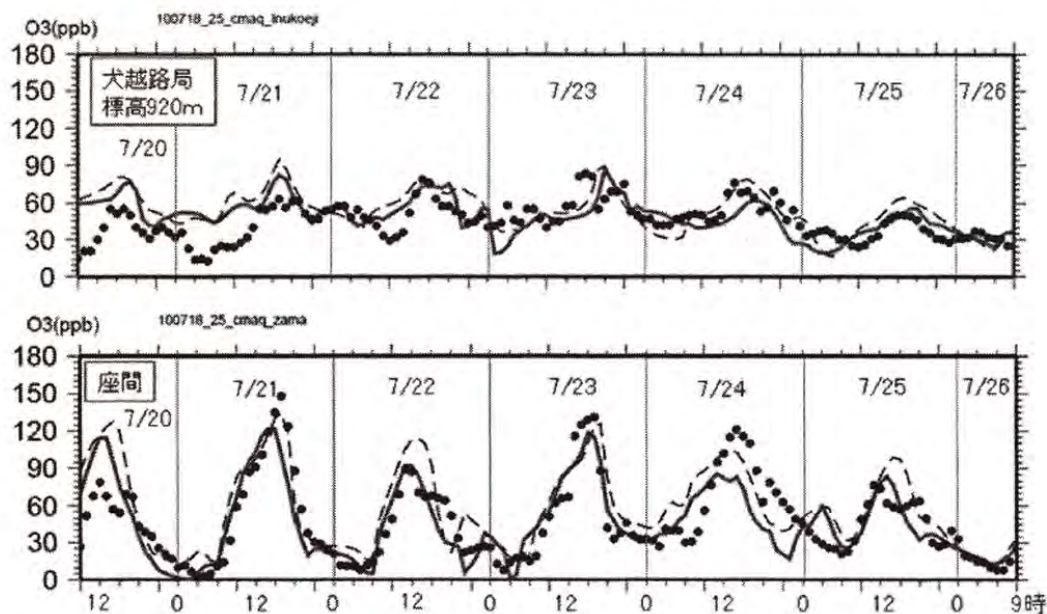


図11 地上オゾン濃度の時刻変化(犬越路局と座間)

(点は実測、実線は大気質モデル5km計算格子間隔、破線は大気質モデル15km計算格子間隔の結果)

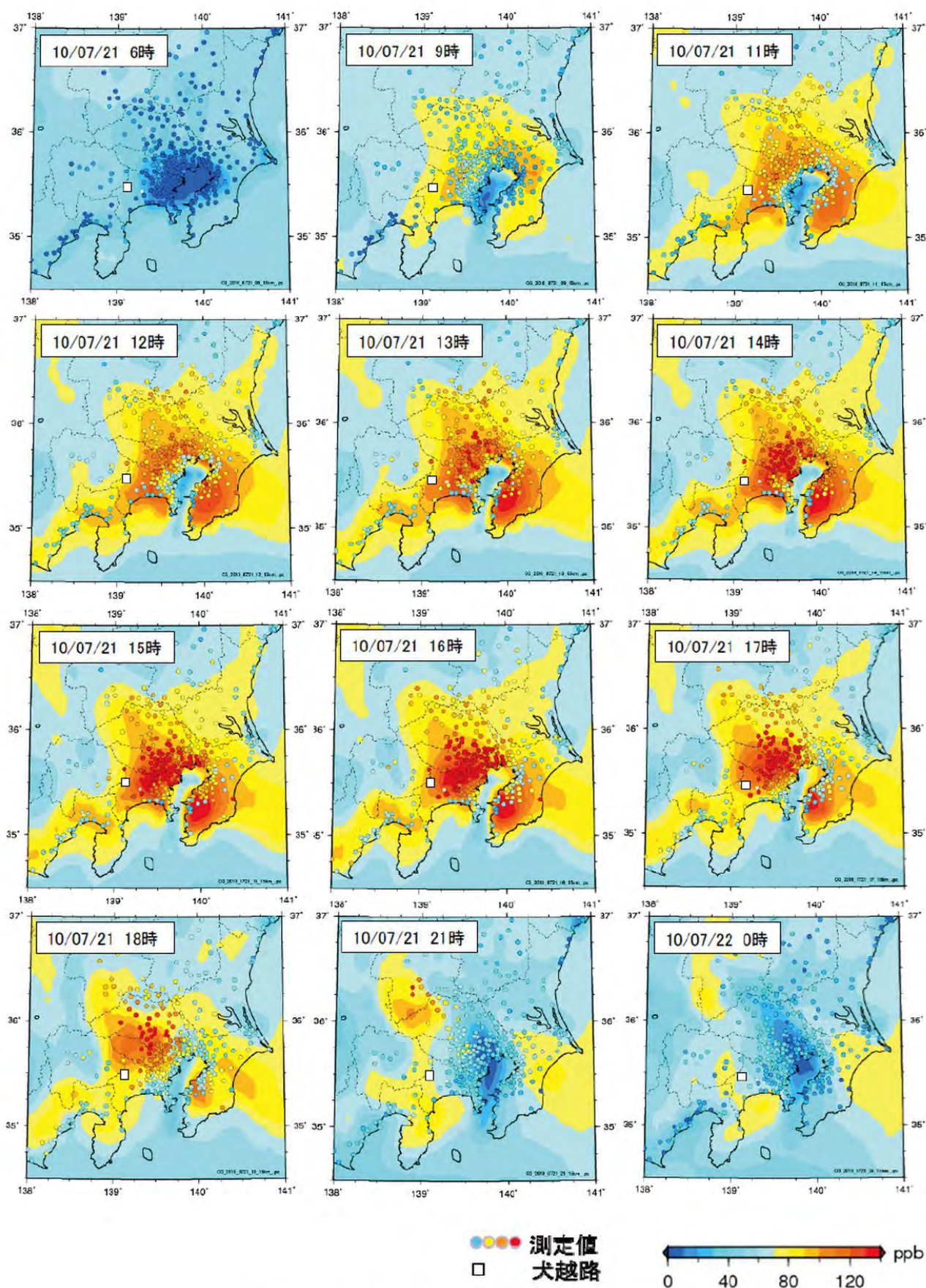


図 12 地上オゾンの水平濃度分布の時刻変化

では、大気境界層内ではほぼオゾン濃度は一定で、大気境界層より上空では減少する傾向であった。大気質モデル (CMAQ) の結果でも、大気境界層の高さで明確な境になっており、大気境界層内ではほぼオゾン濃度は一定になり、観測結果とほぼ一致した。

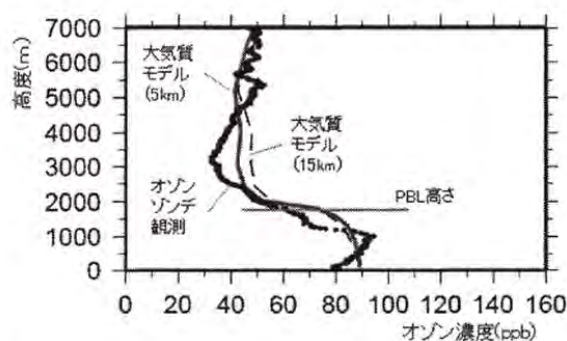


図13 オゾンゾンデ観測と大気質モデルによるオゾンの鉛直濃度分布(2010年7月21日10時)

(点は実測、実線は大気質モデル5km計算格子間隔、破線は大気質モデル15km計算格子間隔の結果)

VII まとめ

2008年から2011年の4年間にわたり丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目指し、気象と大気汚染モニタリングデータの解析、オゾンと気象の立体分布観測や数値シミュレーション解析を実施した結果、次のことが明らかとなった。

神奈川県およびその周辺地域の気象トレンドの解析から、解析対象地域で季節進行に変化が見られること、即ち冬が短くなり夏が長くなって来ていることが明らかとなった。このような変化は、ブナ林の生態系に直接的な影響を与えることに加え、ニホンジカやブナハバチの生態にも影響を及ぼし、食害の影響が加速される可能性も考えられる。

オゾン生成する前駆物質(窒素酸化物と非メタン炭化水素)の濃度は減少しており、濃度の地域間における差が近年少なくなっているが、オゾン濃度は大きく上昇していることが分かった。特に山岳地域の夜間におけるAOT40の増加が顕著であること

が明らかとなり、植物への影響が懸念される。またVOC/NO_x比が最近上昇傾向にあり、反応機構の変化がオゾン増加に関連している可能性がある。

後方流跡線解析の結果、犬越路局に到達する経路として大きく2パターンがあることが分かった。犬越路局で100ppb以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方からの輸送されたものであることが後方流跡線解析から分かった。また、東海地域からの輸送も認められた。

春季と夏季におけるゾンデ観測の結果、丹沢上空は、地上よりもオゾン濃度が高いことが分かった。春季には、上空の広い高度範囲に亘り東アジアを起源とするオゾンの層が存在すること、夏季には1,000 m付近にオゾンのピークが観測され、海風や陸風の局地循環があることが明らかになった。

数値シミュレーション解析からは、水平濃度分布やゾンデ観測と概ね同様の立体分布パターンの状況が再現でき、これを基に生成機構解明がなされた。

今後の課題として、①山岳地域における大気汚染モニタリングと、これに関連させての気象・気候と大気汚染の広域データ解析の継続実施、②オゾンやPM_{2.5}の立体分布観測の実施とモデル解析の活用が望まれる。

VIII 謝 辞

本研究の実施にあたり、愛媛大学農学部の西川敦先生、愛媛大学農学部大気環境研究室の神田勲研究員にご協力、ご助言を頂き、ここに感謝いたします。気象・オゾンゾンデ観測の技術的サポートを頂いたメテオリサーチ株式会社の堀越信治さんに感謝いたします。本研究では、愛媛大学農学部大気環境科学研究室内の学生の卒論が含まれています。特に、泉萌さん、新山翔一さん、奥田梨恵さん、久保龍志さん、武智勝哉さん、高見雄佑さん、野本悠太さんの論文に負うところが大きく、ここに感謝いたします。

IX 引用文献

相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み(II) 神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象, 大気環境学会誌

- 39: A29-A39.
- 阿相敏明・三村春雄・須山芳明・相原敬次・牧野宏・高橋照美・清水源治・若松伸司 (1995) 神奈川県西部地域における大気汚染発生機構の解明(2)－丹沢後背地への光化学オキシダントの流入過程－, 神奈川県環境科学センター研究報告, 18: 7-16.
- Byun, D.W., Schere, K.L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews* 59: 51-77.
- 伊豆田 猛・松村 秀幸 (1997) 植物保護のための対流圏オゾンのクリティカルレベル. *大気環境学会誌* 32: A73-A81.
- 神奈川県 (2011) 大気汚染常時監視測定結果月報 (1時間値)ダウンロードページ, <http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/taiki/data/index.htm>
- 環境省 (2007) 光化学オキシダント・対流圏オゾンに係る知見の整理 (資料3), 第2回光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会.
- Kannari A., Y. Tonooka, T. Baba, K. Murano (2007) Development of multiple-species 1kmx1km resolution hourly basis emissions inventory for Japan, *Atmos. Environ.*, 41: 3428-3439.
- 河野吉久 (2001) 樹木に及ぼす酸性物質の長期慢性影響評価に関する研究. *大気環境学会誌* 36: 47-59.
- 国立環境研究所 (2007) East Asian air pollutant emissions grid database (EAGrid2000). http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid_index_e.html
- 國元浩平・岡崎友紀代・西川 敦・若松伸司 (2010) 近年における日本のAOT40の推移及び地域的比較. 第51回大気環境学会年会 (大阪市). 講演要旨集255.
- 國元浩平・岡崎友紀代・若松伸司 (2012) 神奈川県における光化学オキシダントの解析. 大気環境学会中国四国支部公開講演会 (広島市). 講演要旨集23-26
- 國元浩平 (2012) 神奈川県における平野域と山岳域における光化学オキシダントの濃度分布と変動要因に関する研究. 愛媛大学農学部農学研究科修士課程.
- 松隈大介・下村佳史・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原啓次・飯田信行 (2009) 丹沢山地周辺における高濃度オゾン解析. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集476.
- 松隈大亮・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原敬次・飯田信行・山根正伸 (2010) 丹沢におけるO₃移流経路の検討. 大気環境学会創立50周年記念中国四国支部公開講演会 (広島市). 講演要旨集17-20.
- 三上岳彦 (2005) 都市のヒートアイランド現象とその形成要因－東京首都圏の事例研究－. *地学雑誌* 114: 496-506.
- 岡崎友紀代・相原敬次・阿相敏明・福永明子・高見雄佑・國元浩平・山下真生・武智勝哉・堀越信治・酒井隆・山根正伸・若松伸司 (2010) 神奈川県丹沢地域における2009年夏季のオキシダント濃度分布観測. *愛媛大学農学部紀要* 55: 7-23.
- 斎藤正彦・若松伸司 (2009) 関東地方の森林保全のためのオゾン濃度分布の推定. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集433.
- 斎藤正彦・若松伸司・岡崎友紀代・堀越信治・山根正伸・相原敬次 (2011) 丹沢山地の鉛直オゾン分布に関するモデル解析. 第52回大気環境学会年会 (長崎市). 講演要旨集445.
- 下村佳史・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原啓次・飯田信行 (2009) 丹沢山地における過去30年間の気象トレンド. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集301.
- Suto H., Hattori Y., Tanaka N. and Kohno Y. (2008) Effects of Strong Wind and Ozone on Localized Tree Decline in the Tanzawa Mountains of Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 2: 81-89.
- 高橋信人 (2009) 前線分布でみた日本の季節進行とその近年における傾向. *天気* 56: 713-726.
- UCAR (2008) MM5 Community Model. <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>
- 若松伸司・篠崎光夫 (2001) 広域大気汚染－そのメカニズムから植物への影響まで－, 209pp, 裳華房.
- 山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太

郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明（2007）総合解析．ブナ林の衰退機構と再生の方向，平成13～平成18年度，丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書，104-111.

山下真生・泉 萌・岡崎友紀代・西川 敦・若松伸司（2011）オゾンと気象の立体分布観測(2)．大気環境学会中国四国支部公開講演会（広島市）．講演要旨集13-16.

