

神奈川県

自然環境保全センター報告

第14号 特集 丹沢山地のブナ林再生に向けて
～衰退原因の解明と再生技術の開発～

Bulletin of the
Kanagawa Prefecture Natural Environment Conservation Center

No.14



2016年（平成28年）11月

表紙の写真

(表表紙)

上段左 疎林化が進む檜洞丸山頂付近のブナ林

上段中央 植生の回復が良好な三峰尾根の植生保護柵

下段左 檜洞丸の 대기・気象観測施設

下段中央 葉を食べる大量のブナハバチ幼虫

右 薬剤の樹幹注入によるブナハバチ防除試験

(裏表紙)

良好な環境が残された菰釣山のブナ林。林床にスズタケが繁茂し、中低木が豊富に生育し、階層構造が発達した森林であり、ブナ林再生の目標像の一例といえる。丹沢のなかでも林床にスズタケが繁茂するブナ林は残り少ないが、ここ数年でニホンジカの採食影響が目立つようになり、今後の森林環境の劣化が危惧される。

ブナ林の衰退



ササ草原化が進む不動ノ峰（左）と竜ヶ馬場（右）



ブナ等樹木の立ち枯れにより疎林化が進む檜洞丸山頂付近



1966年（左）と2012年（右）の檜洞丸南向き斜面のブナ林（同一地点）

健全なブナ林とブナの着花から実生まで



菰釣山のうっそうとしたブナ林
丹沢のなかでも林床にスズタケが繁茂するブナ林は今では残り少ない。



ブナの雄花（左上）、雄斗（右上）、堅果（左下）及び実生（右下）
堅果の豊作年の翌年には実生が多く発生するが、シカの採食影響などでほとんどが消失してしまう。

大気・気象と水ストレスの観測



檜洞丸山頂付近の大気・気象観測施設（左）とメンテナンス状況（右）

現在は檜洞丸、丹沢山、菰釣山、鍋割山の4地点で観測を行い、衛星通信によりweb上でリアルタイム観測値を公開している。落雷や台風、アリの営巣などで不具合が生じるたびにメンテナンスのために山に登る必要がある。



山岳地の移動観測に用いるオゾン計（愛媛大学）



ブナへのオゾン影響を測定する犬越路のオープントップチャンバー（環境科学センター・農業技術センター）



檜洞丸でのプレッシャーチャンバー法による葉の水ポテンシャル測定（京都府立大学）
山岳地帯での測定には装置の重量が重く、運搬の負荷が大きい。

ブナハバチによるブナの葉食被害



ブナハバチによる大規模な食害を受けた 2011 年（左）と衰退が進んだ 2016 年（右）の檜洞丸のブナ林
ブナハバチの食害を繰り返し受けることでブナの枯死・衰弱が進行している。



葉を食べるブナハバチの幼虫



樹幹に群がるブナハバチの幼虫



黄色の衝突板トラップに誘引されたブナハバチ成虫
この生態を利用して成虫を捕獲し、食害規模の予測を行っている。

ニホンジカの採食影響と植生保護柵



丹沢の山中でよくみかけるニホンジカ



ニホンジカの採食影響を強く受ける石棚山稜（左）と檜洞丸（右）のブナ林の林床植生
閉鎖林冠下（左）では柵外で植生が減少し、日当たりのよい林冠ギャップ（右）ではニホンジカの不嗜好性植物であるマルバダケブキやオオバイケイソウ、ホソエノアザミなどが繁茂している。



大雪（左）や倒木（右）により破損した植生保護柵
植生保護柵は設置後の持続的な見回りや補修が欠かせない。

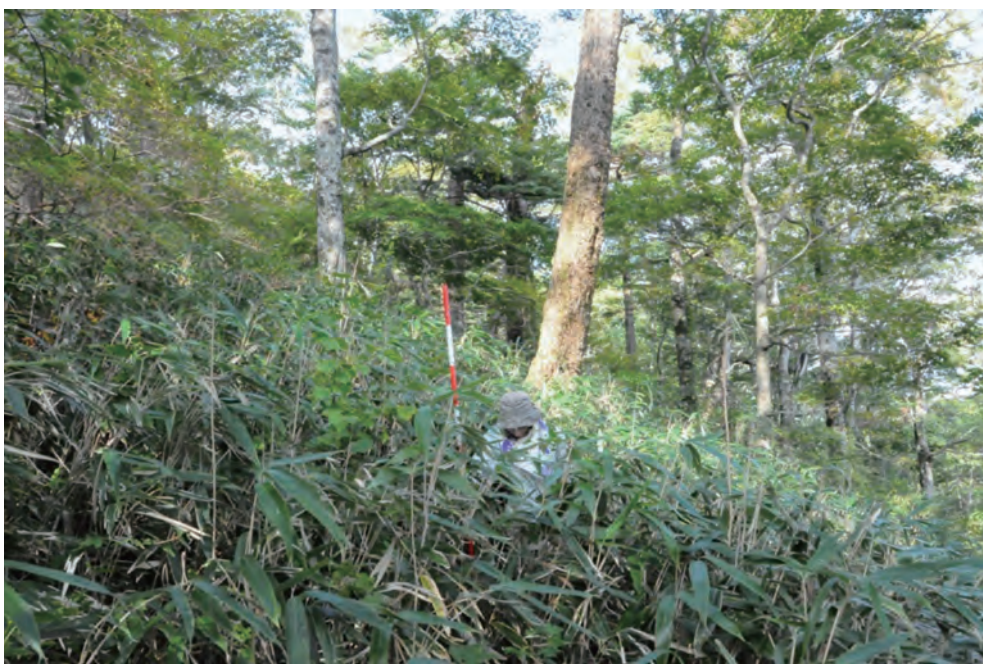
ブナ林の再生試験



ブナ林再生に向けた散布種子数（左）と更新木（右）の調査



苗木生産のための種子採取（左）と採取した種子（右）



三峰尾根の柵内で人の背丈まで回復したスズタケ

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、事業の各部門を備えた中核機関として、平成 12 年度に創設されました。それ以来、丹沢大山地域の自然再生をはじめとした森林環境に関わる近年の様々な課題に対応するために、森林管理・自然公園・野生動物の各分野の事業とそれに関する普及啓発・県民協働や試験研究が一丸となって業務を推進しています。

「自然環境保全センター報告」は、このような当センターにおける日々の業務から得られた様々な成果や自然情報及び知見を県民や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。

第 14 号は、「丹沢山地のブナ林再生に向けて ～衰退原因の解明と再生技術の開発～」と銘打った特集としました。

丹沢山地において昭和 50 年代にブナ林の衰退が顕在化して以降、平成 5 年から行われた「丹沢大山自然環境総合調査」、平成 16 年から行われた「丹沢大山総合調査」を通じてその衰退の実態が明らかにされています。

その後も当センターでは、ブナ林の衰退に歯止めをかけ、再生を目指すべく、各総合調査の後に策定された「丹沢大山保全計画」や「丹沢大山自然再生計画」の主要な施策としてブナ林の保全・再生を位置づけて、平成 19 年からは個人県民税の超過課税である水源環境税を活用しながら、県内の研究機関や大学等と共同した調査研究プロジェクトを進めてきました。

その結果、オゾン、水ストレスおよびブナハバチの影響が連関して作用する衰退の仕組みの解明が進み、それに対応する再生技術開発の目途がつき、今後は対策の実行を段階的に進める段階に入っていると考えています。

本特集号では、今後の対策実施に向けて、調査研究プロジェクトメンバーにより集積された、ここ 5 年間の新たな成果をとりまとめて掲載しました。

ブナ林の再生には、50 年、100 年という世代を越えた息のながい取り組みが必要です。本特集の成果が、丹沢山地の自然の現状への理解を深め、丹沢のシンボル・豊かなブナ林を再生し、次世代に引き継ぐための一助となることを願っています。

平成 28 年 11 月

神奈川県自然環境保全センター所長 稲垣 敏 明

目 次

発刊にあたって

特集 丹沢山地のブナ林再生に向けて ～衰退原因の解明と再生技術の開発～

ブナ林の衰退機構

丹沢山地ブナ林の衰退要因とその複合作用	1
谷脇 徹・相原敬次・齋藤央嗣・山根正伸	

ブナ林の大気環境

神奈川県丹沢地域における大気中オゾンの動態	13
大森成晃・神田 勲・相原敬次・齋藤央嗣・岡崎友紀代・若松伸司	
犬越路におけるオゾン濃度の経年変化及びブナ生育への影響評価	27
武田麻由子・十河孝夫・北見 丘・美濃口薫	
丹沢山地の風況解析	33
斎藤正彦・齋藤央嗣・相原敬次・谷脇 徹	

葉食昆虫（ブナハバチ）の食害調査

丹沢山地におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への食害発生状況（2014-2015）	37
谷 晋・伴野英雄	

水ストレスの診断

丹沢山地の衰退ブナ林に適した水ストレス診断手法の開発	41
上田正文・城向光弥・水野沙保里	
ブナの水欠差測定による丹沢山地の水分ストレス評価	49
相原敬次・谷脇 徹・齋藤央嗣・越地 正	

保全・再生技術の開発

気象要因からみた丹沢山地のブナハバチ幼虫による食葉害の発生予測	53
相原敬次・谷脇 徹・齋藤央嗣・越地正・谷 晋・伴野英雄・山上 明	
丹沢山地におけるブナハバチ対策	59
谷脇徹・相原敬次・齋藤央嗣・山根正伸・伴野英雄・山上 明・谷 晋	
植生保護柵を用いた丹沢のブナ等冷温帯森林の再生 ―天然更新と植栽の試験から―	67
田村 淳・谷脇 徹・井田忠夫・中西のりこ・吉田直哉	

効果的なブナ林再生

衰退リスクから見たブナ林の再生優先地マップの作成	75
鈴木 透・谷脇 徹・山根正伸	
丹沢山地の再生優先地マップに基づいた統合的なブナ林再生事業	81
谷脇 徹・永田幸志・西口孝雄・田村 淳・鈴木 透・山根正伸	

丹沢山地ブナ林の衰退要因とその複合作用

谷脇 徹*・相原敬次*・齋藤央嗣*・山根正伸**

Factors and its interactive effects on beech forests decline in the Tanzawa Mountains

Tooru TANIWAKI*, Keiji AIHARA*, Hiroshi SAITO*
and Masanobu YAMANE**

要 旨

谷脇徹・相原敬次・齋藤央嗣・山根正伸：丹沢山地のブナ林の衰退要因とその複合作用 神奈川県自環保セ報告 14 : 1-12, 2016 丹沢山地のブナ林衰退の実態と、衰退要因と考えられるオゾン、水ストレスおよびブナハバチの影響に関する知見を整理し、衰退機構の要因連関仮説を検証した。丹沢山地のブナ林では、蛭ヶ岳から丹沢山にかけての主稜線や檜洞丸の山頂付近を中心に草地・裸地の拡大が生じていた。オゾンは高標高域で高い濃度が観測され、衰退地や風衝地を中心としてブナの成長抑制を引き起こしている可能性が高い。林冠ギャップ（以下、ギャップ）拡大などの環境変化による局所的な乾燥化はブナの慢性的な水ストレスを増大助長していると考えられた。ブナハバチの食害影響は、ギャップ周辺の水ストレスやオゾン影響を受けている個体に強く現れると考えられ、ギャップの拡大や林床植生の退行が進んだ地点では各要因の作用が助長されることが強く示唆された。衰退機構の要因連関仮説を支持・補強すると思われる知見に基づき、衰退リスク評価の基礎となる衰退要因と立地環境との関係を示す概念図を提案した。

キーワード：オゾン、水ストレス、ブナハバチ、立地環境、ギャップ

I はじめに

我が国における森林の衰退現象は、1970～1980年代頃から大気汚染との関係で注目されるようになる。代表的なものとして、関東地方や関西瀬戸内地方の平野部のスギ林（高橋ら 1986、1991；堀田 1991；梨本・高橋 1991 など）、奥日光のダケカンバ林（伊豆田・小川 2004）、大台ヶ原のトウヒ林（日野ら 2003 など）、英彦山のブナ林（猪上ら 2002）などが知られている。

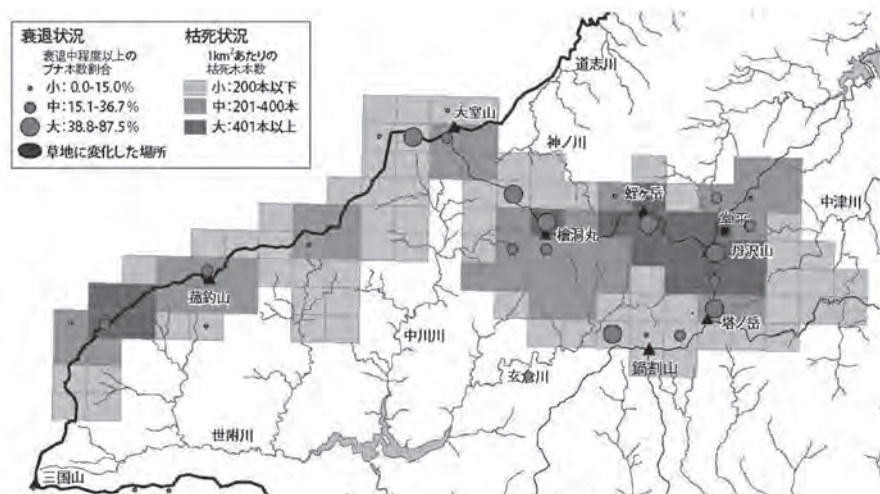
神奈川県丹沢山地でも 1970 年代から丹沢山地において森林衰退が生じており、原因解明のための

様々な調査が行われてきた。1960～1970 年代にかけて大山モミ林で集団的な立ち枯れが生じ、二酸化硫黄など大気汚染とハラアカマイマイ大量発生の影響が推測された（神奈川県環境部大気保全課 1994）。このときの大気汚染はブナの枯死・衰弱にも関与したとされる（相原ら 2004；越地ら 2012a）。1980 年代以降には増加したニホンジカ（以下、シカ）によるウラジロモミの樹皮剥ぎによる立ち枯れが目立つようになる（越地ら 2012a）。1990 年代からは、ブナハバチによるブナ葉の食害が顕在化した（越地 2002；山上ら 2001）。

このように、丹沢山地では年代によって影響す

* 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）

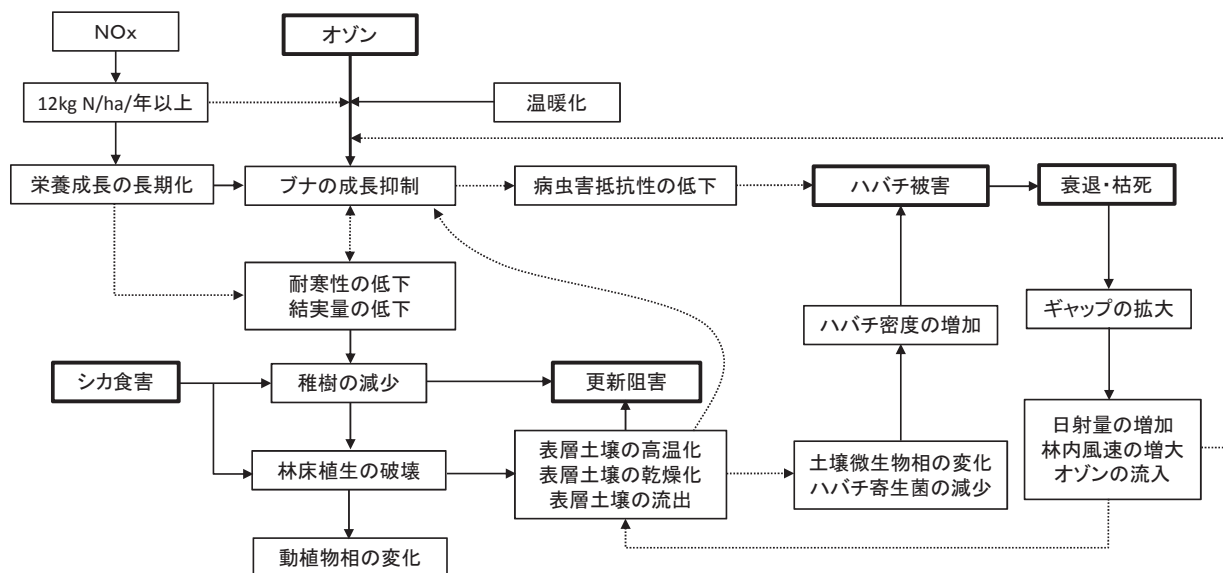
** 神奈川県自然環境保全センター研究企画部（〒 243-0121 神奈川県厚木市七沢 657）



このことを踏まえ神奈川県自然環境保全センターでは、ブナ林衰退機構解明プロジェクトにおいてこれら3要因の実態把握やブナ林への影響解明に取り

なお、本稿では衰退関連の用語として、単木単位で樹勢の低下が生じることを衰弱、枯れることを枯死とし、森林・林分で集団的に枯死や衰弱が生じることを衰退として統一する。

II ブナ林の衰退状況



山根 2013；本特集の鈴木ら 2016）や植生へのシカ採食影響調査（田村 2007、2008、2010、2013；田村ら 2013）などを通じて、蛭ヶ岳から丹沢山にかけての主稜線や檜洞丸の山頂付近で、更新阻害が生じるなかでブナ等高木の衰弱が進み枯死することで草地・裸地が拡大しており、ブナの枯死・衰弱の累積に伴って森林環境が変化していることが明らかにされてきている。

丹沢山地のブナ林の衰退実態に関しては、ブナ等の高木の枯死は 1970～1980 年代以降から目立ち始め（越地ら 1996）、1990 年代以降になると枯死に起因する林冠ギャップ（以下、ギャップ）地（草地・裸地）の増加と広葉樹高木林の減少傾向が明瞭になり、2000 年代以降もブナ林の衰退は継続している（山根・鈴木 2012；鈴木・山根 2013；本特集の鈴木ら 2016）。

衰退は、丹沢ブナ林で全面的に生じている訳ではなく、1990 年代以降では高標高域、とく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（山根・鈴木 2012；鈴木・山根 2013；本特集の鈴木ら 2016）の南～西向き斜面を中心に生じている（山根・鈴木 2012；鈴木・山根 2013）。

枯死や衰弱が目立つ樹種はおもにブナである。丹沢山地のブナ林は、カエデ類やシナノキなどの落葉広葉樹高木のなかにブナが 4～87% の割合で混交し、檜洞丸山頂付近の調査からは、樹勢と枝伸長量の低下、葉色の悪化、葉の壊死などの衰弱症状はブナを中心に観察される（山根ら 2009）。ただし、衰退が進んだ林分では立木密度が低下し、ブナ以外の高木樹種でも、衰弱症状が進行した個体が多くみられている（山根ら 2009）。

ブナ林衰退地では、更新が進んでおらず、森林がミヤマクマザサやシカ不嗜好性植物を中心とする草地へと移行している（写真 1）。通常、健全なブナ林では高木が枯死した後、ブナ等の次世代が更新することで森林として再生するが、シカの採食影響が大きい条件下では、後継樹が採食され減少・消失し、天然更新が阻害されている（本特集の田村ら 2016 など）。丹沢山地ではシカが全般に過密化しており、とくに、ブナ林の衰退が進んできた高標高域で高密度状態がみられ（藤森ら 2013；永田ら 2013）、過採食によるスズタケの退行やシカの不嗜好性植物の増加、希少植物の減少、ブナを含む各種高木の天然更新の阻害など、林床植生の退行が顕在化している



写真 1 シカ不嗜好性植物が優占する草原化が進む檜洞丸の山頂付近

（田村 2007、2008、2010、2013；Tamura 2016；田村ら 2011、2013）。このように、草地・裸地化が進んだブナ林の衰退地では、土壌侵食による森林の荒廃が懸念される状況が生じている（山根ら 2007）。ブナ等の高木の枯死・衰弱が進んでいる蛭ヶ岳では、樹木の消失にともない、リターや中～粗大な根、土壌有機物含有量の減少や土壌硬度の増加が観測され（Higashi *et al.* 2003）、ブナ林の消失が土壌環境にも影響を及ぼすことが示されている。

Ⅲ ブナを枯死・衰弱させる要因

丹沢山地において複合的に作用している主な衰退要因と指摘されたオゾン、水ストレス、ブナハバチの影響については、以下のような知見が集積されてきた。

1 オゾン

丹沢山地のブナ林では広範囲でオゾン濃度が高く、風衝地や衰退が進みギャップが形成された地点のブナに強く影響していることを示す知見が、現地観測や現地実験、シミュレーションを通じて集積されている。

オゾンは酸化力が強く、葉の気孔のガス交換により葉内に取り込まれると葉緑体の機能を阻害することが知られている（伊豆田ら 2001）。ブナはコナラやミズナラよりオゾン感受性が高く、国内外の 16 樹種（針葉樹 8 種、落葉広葉樹 8 種）を比較すると 3 番目の感受性の高さとされた（伊豆田ら 2001）。

神奈川県のおゾン濃度は近年上昇傾向にあり、オゾン影響の指標となる AOT40 は、1990 年代～2000

年代前半には日中が $10\text{ppm} \cdot \text{h}$ 前後、夜間が $2 \sim 3\text{ppm} \cdot \text{h}$ で推移したが、2000 年代後半になると日中が $15\text{ppm} \cdot \text{h}$ 前後、夜間は $5\text{ppm} \cdot \text{h}$ 前後で推移するようになった(若松ら 2013)。オゾン濃度の上昇傾向は特に春期と夏期で顕著であった(若松ら 2013)。現在の丹沢山地では硫黄酸化物(SO_x)や窒素酸化物(NO_x)濃度が低い一方で、ブナの成長や光合成を低下させる高濃度オゾンが観測(丸田ら 1999; 阿相ら 2007; 河野ら 2007; 若松ら 2013)され、シミュレーションによってもオゾンの暴露量(AOT40)、気孔取込み量(POD1)ともにブナ林広域でクリティカルレベルを超えることが確認されている(斎藤ら 2013)。

丹沢の高濃度オゾンは関東地方からの輸送が多いが、東海地方からの輸送も認められる(松隈ら 2012; 斎藤ら 2012b)。太平洋高気圧に覆われた夏期には南風が卓越し、夜間の陸風によりいったん相模湾に移送された大気汚染物質から日中に光化学反応でオゾンが生成され、海風により丹沢山地に移送される可能性が考えられている(丸田ら 1999; 松隈ら 2012)。

山岳地のオゾン濃度は平地に比べて高く、鉛直分布をみるとブナが生育する標高帯に濃度のピークが認められる(斎藤ら 2012a, b)。とくに光化学反応によるオゾン生成が生じない夜間でも、山岳地では都市部と異なり高濃度が維持される傾向がある(斎藤ら 2012a; 若松ら 2013)。これは、山岳地では夜間の風が弱いため移流や拡散が小さく、 NO_x 等との化学反応や湿性沈着等によるオゾン消失が少ないと、日中に生成されたオゾンが夜間もそのまま保たれ高濃度を維持しやすいためと考えられている(斎藤ら 2012a; 若松ら 2013)。

丹沢山地でのオゾンのブナへの具体的な影響については、西丹沢の犬越路における3年間の累積的な大気オゾン影響をオープントップチャンバーを用いて観測した研究から、葉のクロロフィル含量や最大光量子収率の低下、全乾燥重量の61.3%の低下および早期の落葉が報告されている(武田・相原 2007)。また温室内の実験では、一成長期のオゾン暴露がブナ苗の葉面積や個体乾重量、相対成長率や純同化率を減少させ(清水・伊藤 2013)、翌年のブナ苗の展葉を遅延させる(Yonekura *et al.* 2004)ことも示されている。オゾンはまた、植物体内における光合成の同化産物の分配パターンを変化させ

(伊豆田 2001)、短時間の暴露でもブナ苗の光合成産物の転流パターンを変化させた(関 2012)。ただし、極めて高濃度の短期的な暴露(200ppb、24時間)では可視傷害や葉緑素含量、蒸散速度、光合成速度などには急性的な影響はみられていない(清水・伊藤 2013)。

オゾン濃度が高い高標高のなかでも、影響の程度は立地や森林の状態によって異なることも分かってきた。蛭ヶ岳から丹沢山・竜ヶ馬場にかけて確認されている衰退地は南向き斜面に集中しているが、これは地形に起因して風速が増加する地点と対応するものであり、衰退現象の局地性は局地風の影響を強く受けていることが示唆されている(河野ら 2007; Suto *et al.* 2008)。風とオゾン濃度の複合影響を評価する移流フラックスは、地表面に平行に輸送されるオゾンの量を表しており、衰退状況との対応は、濃度としてより移流フラックスとして評価したほうが良好であった(河野ら 2007; Suto *et al.* 2008)。さらにオゾン濃度は、周囲が開けた地点のほうが、周囲に樹木が多い地点より暴露量が増えることがパッシブサンプラーにより観測された(阿相ら 2007)。林床植生が破壊され、ギャップが拡大した地点では、林内風速が高くなるためオゾンの移流フラックスも増大し、加速的に衰退が進行すると考えられている(河野ら 2007)。このことは林内のオゾン濃度の水平分布が林縁より樹林の中心に向かって濃度が漸減する傾向を示し、物質密度が高い樹林のほうがオゾンの減衰効果が高くなる(荒木ら 1983)ことから裏付けられる。このように風の複合作用によりオゾン影響が大きい地点で、林床植生が退化したうえに林冠の閉鎖が崩れると、林内に高濃度オゾンが入り込むようになり、高木の枯死・衰弱が加速する可能性があることが示されている。

2 水ストレス

丹沢山地では環境変化による山地広域の乾燥化、風衝地での乾燥化、ギャップ拡大による局所的な乾燥化によりブナの慢性的な水ストレスが増大しており、水分通道の悪化が水ストレス症状を助長しているとする知見が集積されてきた。

ブナはコナラやミズナラと比較して水ストレスに敏感とされ(Maruyama & Toyama 1987)、大気飽差が上昇するとブナ樹冠における光合成速度や気孔コンダクタンスが低下し、蒸散速度が上昇するとされ

る（斎藤ら 2001）。実験的には水ストレス処理により 7 月以降にブナ苗の葉の水ポテンシャルが、8 月以降に純光合成速度、気孔コンダクタンスおよび蒸散速度がそれぞれ低下し（Yonekura *et al.* 2001）、ブナ苗の葉面積や個体乾重量、相対成長率、純同化率の減少を引き起こした（清水・伊藤 2013）。また、相原ら（2012）は、檜洞丸の衰退地でブナの樹液流を計測し、昼間の 1 割を超える過剰な蒸散量が夜間に算出される個体があり、水収支の不均衡による水ストレスが生じている可能性を指摘した。

さらに、上田ら（2016）が檜洞丸の衰退地と健全地に生育するブナで詳細な調査を行い、衰退地に生育する衰弱ブナでは水分通道組織について平均道管内径が小さく、木部のキャビテーション感受性が高い傾向にあり、葉の水ポテンシャルが低下し、顕著な水不足の状態にあることが確かめられた。蛭ヶ岳から丹沢山・竜ヶ馬場にかけての風衝地では卓越風による乾燥のストレス（星ら 1997；山根ら 2007a；Suto *et al.* 2008）が強く作用してブナ等高木が枯死する場合があると考えられる。山頂や稜線に位置するオオモミジガサブナ群集は、霧の影響により多湿でありながら風の影響を強く受けており、一度破壊された林分の回復は困難であることが、1964 年の時点ですでに指摘されていた（宮脇ら 1964）。

ただし、その背景には近年の環境変化も関わっていると考えられている（河野ら 2007；山根ら 2007a）。温暖化は将来のブナ林分布適域を減少させると予測しており（松井ら 2009）、丹沢のブナ林では 1990 年代以降、冬期の温暖化や少雪化傾向が見られ（山根ら 2007b；若松ら 2013）、それに伴う山地全体の相対湿度の低下・乾燥化が懸念されている（相原ら 2004）。

また、過密化したシカ採食により植生退行が顕在化し、それに伴う林内や土壌の乾燥化の可能性も指摘されている（山根ら 2007a）。2013～2014 年には山地広域でスズタケの一斉開花が確認され（永田・田村 2014、2015）、開花後の枯死に伴う林床植生のさらなる減少が懸念される。さらに、衰退地では気温や地温の上昇と相対湿度の低下が生じる（戸塚ら 1997a）ことから、衰退の進行が局所的な乾燥のストレスを助長すると考えられる。1990 年代以降、複合的な要因によりブナが受ける水ストレスが増大していることが窺える。これら要因が乾燥化にどの

程度寄与しているかは今後の課題であるが、森林内のサルオガセ類など懸垂性の地衣類に減少傾向が認められる（吉田ら 1997）ように、森林内の乾燥化が進んでいる可能性は高い。

このように水ストレスは、卓越風の影響を強く受ける場所があるなかで、1990 年代以降に顕在化した広域での温暖化や植生退行と局所的なギャップ拡大により慢性的な影響が増大したとみることができる。

3 ブナハバチ

ブナ林の衰退に関与していることが疑われていた新種のハバチについては、食害の発生実態とブナ枯死との関係や、生態と大発生機構に関する研究が進み、1990 年代以降のブナの枯死に最も寄与していることを示す知見が集積されている。

ブナハバチは幼虫がブナとイヌブナの葉を食べる葉蜂の仲間で、北海道、本州、四国、九州に分布する日本固有種であり、比較的最近の 2000 年に新属新種として記載されている（Shinohara *et al.* 2000）。

ブナハバチの突発的な食害は各地で散見されるが（桃澤 1999、野澤 2009、上田ら 2013 など）、度重なる食害により広域で枯死・衰弱症状が観察されているのは丹沢山地のみである。丹沢山地において初めてブナハバチの食害が確認されたのが 1993 年（山上ら 2001；越地 2002）であり、1997 年からは広域の食害調査が実施され、大規模な食害が 1997 年、1998 年、2007 年、2011 年、2013 年に観察された（山上ら 2007；谷ら 2008、2012a、2014）。食害には明らかな周期性はみられず、ほとんど被害のない年から激しい被害の年まで、その度合いは突発的に大きく変動する傾向があることが分かってきた（谷ら 2012）。食害の中心地域は、1990 年代は檜洞丸から丹沢山・堂平にかけてであったが、2010 年代には加入道山や大室山から檜洞丸で激しくなり、徐々に西方向に拡大している（谷ら 2012a；本特集の谷・伴野 2016）。

当初は、ブナハバチの食害でブナは枯死しないと思われていたが、調査が進むにつれ、食害や摘葉試験により年輪幅の減少（越地ら 2005、2006）や枝先枯れ（桃澤 1999；越地 2002）が生じることが分かり、さらに複数回の食害で枯死・衰弱する個体が確認された（山上ら 2007；越地ら 2012b）。一方、

複数回の食害でも衰弱症状が現れない個体もあり(越地ら 2012b)、激しい食害が必ずしも枯死を招く訳ではないことが示された。ブナハバチ食害によるブナ枯死・衰弱への影響を調べるため檜洞丸の南向き斜面の衰退地に設定した0.7ha固定試験地の観察からは、ギャップ周辺のブナの26%がブナハバチの食害影響などで枯死し、1997年に0.1haであったギャップが2010年には0.3haまで拡大しており、食害による枯死はギャップ周辺に多く発生している(越地ら 2012b)。このような観察から、上述のとおり高標高のギャップ周辺に生育するブナは、高濃度オゾンと水ストレス影響を強く受けており、そのような個体が、ブナハバチの食害を受けると枯死に至ることが示唆される。

ブナハバチの生態も徐々に明らかとなってきた。丹沢山地の高標高域において、メス成虫は5月中～下旬を中心に羽化する(谷脇 2015)。現地採取繭の飼育実験と地温測定により越冬後から羽化するまでの発育ゼロ点と有効積算温度を調べたところ、サンプル数は不十分ながら、発育ゼロ点が2.47℃、有効積算温度が242～268日度と算出された(谷脇未発表)。羽化した成虫の食物はブナの当年枝などに大あごで噛み傷をつけて滲出する樹液であり、これを摂取することにより卵生産と生存日数が増加し、本種本来の繁殖力が発揮されることが示唆されている(谷脇 2014a、b)。産卵は展開途中の若葉の葉裏葉脈沿いに1卵ずつ行われる(Shinohara *et al.* 2000)。1メスあたりの産卵数は平均25卵(山上ら 2005)や35卵(谷脇 2014a)とされる。

5月下旬～6月上旬に孵化した幼虫は葉を食べて成長し、6月中～下旬に摂食を完了して終齢になると土中に潜り繭を形成する(谷脇 2015)。幼虫の齢期はオスとメスで異なり、オスの終齢は5齢、メスでは6齢である(Shinohara *et al.* 2000)。発育速度の指標である発育ゼロ点と有効積算温度は、卵が6.7℃と57日度、オス幼虫が5.5℃と175日度、メス幼虫が4.4℃と256日度とされる(谷ら 2009)。幼虫の大発生時の食害による失葉は幼虫の体サイズが大きくなる6月中～下旬に一気に進行し、幼虫が消失する7月上旬までに終息する(谷脇 2015)。

繭形成後は前蛹となり、そのまま越冬して春に蛹化・羽化して成虫となる。大規模な食害は、繭が高密度化した地点で展葉期に大量のメス成虫が発生することで生じると考えられる(谷脇ら 2012、

2013)。特に展葉の遅い個体は、若葉の出現を待ち構えるメス成虫の産卵を受けやすいとされる(田村ら 2005；山上ら 2007)。前蛹の状態で2年以上長期休眠する個体もあり、その割合は年によって異なるため、毎年同じ密度の繭が加わっても成虫の羽化数が3倍近く異なる場合があり得る(谷ら 2012b)。ブナハバチの突発的な大量発生は、長期休眠によって蓄積された繭の一斉羽化により生じている可能性がある(谷ら 2008)。

丹沢山地におけるブナハバチの高密度化の原因については当初不明であったが、調査の進展に伴い、ブナ林の衰退に伴う微気象や林内環境の変化、あるいはブナハバチを巡る生物間の相互関係の攪乱が関係することが示唆された(山上ら 2007；山根ら 2009；越地ら 2012b)。

このことについては土壤環境と土中に形成された繭との関係が推察されるに至る。植生被覆の減少とそれに伴うリター流出は、植生とリター双方の蒸発抑制効果を低下させ、表層土壤の乾燥化を生じやすくさせると考える(谷脇ら 2014)。また、衰退が進み、直射光が地表面に到達するようになり、地温が上昇する(戸塚ら 1997a)ことでも乾燥化が進むと考えられる。この点を検証するため、筆者が2011～2013年に丹沢山の閉鎖林冠下とギャップ下、ササ林床と退行林床(シカ採食影響の強い高茎草本群落)の組み合わせで表層土壤の地温を測定したところ、ギャップの退行林床で顕著に地温が高い一方で、ササ林床では林冠の状態にかかわらず同程度に低くなることが確認された(谷脇未発表)。

このような地温の上昇とそれに伴う土壤乾燥化は、繭の生存と発育を促進する可能性がある。まず土壤含水率が低いほど、ブナハバチの繭形成前後の生存率は上昇することが室内実験から明らかとなった(谷脇ら 2014)。林床植生が退行しギャップが拡大した森林では表層土壤の含水率が低下していると考えられ、ブナハバチ繭が生存しやすい環境となっている可能性がある。発育の促進に関しては、先に示した発育ゼロ点と有効積算温度を用いて地温から羽化時期を推定したところ、推定された羽化時期は現地の羽化期間とよく一致しており、そのなかでも林冠ギャップが形成されている場所の林床では、顕著に羽化の早期化があると推定された(谷脇未発表)。このことは、衰退地では地温上昇によりメス成虫の羽化が早まることで、これまで早期の展葉完

了により産卵を回避していたブナでも産卵・食害のリスクが高まることを示唆している。

このような知見は、ブナハバチによる食害影響が、とくにギャップ周辺で水ストレスやオゾン影響を受けている個体で強く現れる可能性があることを示している。また、ブナ林の衰退が進み、土壌の乾燥化や地温上昇が進むことで、ブナハバチの生存率が上昇し、羽化の早期化に伴って産卵・食害リスクが高まる可能性も示された。

IV 各要因の複合作用

ブナ林を衰退するそれぞれの要因は、複合的に作用し（河野ら 2007）（図 2）、それらの影響の度合いはブナ林が成立する立地により異なっていると考えられている。

例えば、山根ら（2009）は衰退要因の空間階層的關係を検討し、マクロ（高標高域全体）スケールでは大気汚染が広く影響し、メソ（山頂、主尾根）スケールではマクロスケールの濃度分布に応じて、小地形と関係した卓越風の強さによりオゾン影響が変わる（丸田ら 1999）ことに加えて、斜面方位や位置、傾斜などにより植生状態への水ストレスの程度が異なってくる。サイト（林分）スケールでは、微地形や微気象、植生状態などの林分環境によるブナハバチ大発生のしやすさ、本種による食害に対するブナの反応の個体差によって衰退が異なると考えている。

このような関係について、これまで本論で整理した知見に基づく、主要な衰退要因と立地環境との関係を重ね合わせて整理し、複合的な要因による影響の強さを概念的に描いたのが図 3 である。この図では、衰退にかかわる要因が強まる場所が重なり合った立地ほど衰退が進みやすいことを示している。

すなわち丹沢山地のブナ林は、広域で植生に対してシカ採食影響が強く出ており（田村ら 2013）、更新阻害や林床植生の退行・消失による土壌乾燥化が生じている。オゾンの影響は、高標高ほど強まり（斎藤ら 2013）、そのなかでも山頂や稜線では卓越風の影響が大きい地点（星ら 1997；Suto *et al.* 2008；本特集の斎藤ら 2016）で影響が増幅されると考えられる。

さらに、過去にブナ林が衰退しギャップが形成された場所や、1990 年代以降にブナハバチ食害によっ

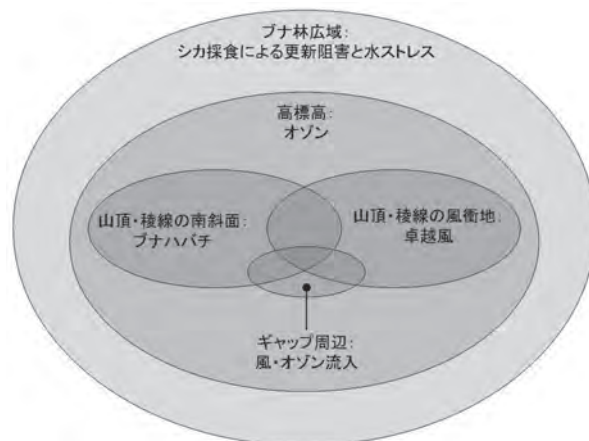


図 3 立地環境と複合影響の概念図

てブナの枯死とギャップ拡大が進んだ地点（山上ら 2007；越地ら 2012b）やその林縁部分では、乾燥やオゾン影響が助長されると考えられる。衰退地での影響拡大に関しては、戸塚らは、檜洞丸の衰退地では健全地より日中の気温や地温が高く相対湿度が低く（戸塚ら 1997a）、高濃度オゾンの出現頻度が高くなる（戸塚ら 1997b）ことを観測している。また、オゾン濃度は周囲が開けた地点のほうが、周囲に樹木が多い地点より暴露量が増えることも観測されている（阿相ら 2007）。

このように、ブナの衰退要因が強まる立地ほど衰退リスクが高まる。ただし、各要因の作用は年代ごとに程度が異なっていると考えられる。シカの採食や温暖化の影響は 1980 年代から目立ちはじめ 1990 年代中頃に顕在化し、ブナハバチの大規模な食害は 1990 年代後半以降に確認されるようになり、衰退地の分布はそのような時代変遷を映し出していると考えられる。

各要因の作用はまた、山地のなかでも地点によって程度が異なってくると考えられる。蛭ヶ岳から丹沢山・竜ヶ馬場にかけては、南西卓越風の影響が大きく（Suto *et al.* 2008；本特集の斎藤ら 2016）、拡大が続いているギャップ（本特集の鈴木ら 2016）周辺では卓越風やオゾン影響が大きいと考えられる。ブナハバチの食害の中心は西方向に移動しており、直近の大発生年である 2011 年と 2013 年では、大室山から檜洞丸にかけて食害の累積が多く、今後、ギャップが拡大していく可能性が高い（本特集の鈴木ら 2016）。南向き斜面では卓越風影響のほか、ブナハバチ食害が大きくなること（本特集の谷・伴野 2016）が指摘されている。

以上のように、丹沢ブナ林衰退機構の要因連関仮説（河野ら 2007；山根ら 2007a）に関する衰退要因の個別影響及び複合影響を立地環境との関係で整理したが、河野ら（2007）の要因連関図（図2）においては検証が不十分な項目も残されている。ブナハバチについては、表層土壌の高温化が羽化を早めることで、産卵密度の増加を引き起こす可能性があることが新たに分かった。ブナハバチと土壌との関係について河野ら（2007）は、表層土壌の高温化・乾燥化がハバチ寄生菌の減少につながることを指摘した（図2）が、実験的には土壌含水率が増加すると繭からのカビの発生は減少したことが示されており（谷脇ら 2014）、土壌環境と寄生菌との関係は慎重に検討する必要があることも分かった。また衰退地におけるより詳細な土壌含水率の解明も必要であった。衰退によるブナハバチを巡る生物間の相互関係の攪乱の可能性（山上ら 2007；山根ら 2009；越地ら 2012b）については、ヒメバチ科の捕食寄生蜂相が明らかになってきており（谷脇・渡辺 2012）、森林環境やブナハバチ発生量との関係を検討していく必要がある。

オゾン影響を助長する要因とされる窒素負荷（渡辺・山口 2011）については河野ら（2007）の要因連関図（図2）でも示されているが、丹沢山地の衰退地での実態についてほとんど分かっていないのが現状であり、今後のデータ蓄積が課題となっている。また、同様に要因連関図（図2）で示されたブナの成長抑制やその生理的な影響を衰退地において調査した文献はほとんどなく、病虫害抵抗性や耐寒性・結実量との関係は明らかになっていない。病虫害抵抗性については、ブナ苗での一成長期のオゾン暴露では翌年の展葉時期が遅延する（Yonekura *et al.* 2004）とされており、現地の成木でも同様のことが生じているとすれば、ブナハバチ被害のリスクが高まることになる。その他、葉のタンニンなどの防御物質の減少が生じているかなども検討する必要がある。Yonekura *et al.* (2004) の報告では、前年のオゾン暴露では冬芽の耐寒性は変化しなかったが、長期的・複合的な影響で衰弱が進行した成木の情報は無い。結実量については、ブナ種子の豊作年であった2006年の健全種子の割合は堂平が45%であったのに対して、丹沢山が5%、檜洞丸が1%に過ぎなかった（谷脇ら 2008）とする報告がある。しかし、結実量は年変動が極めて大きいという、ブナ

の花粉密度や虫害など様々な要因が関与する（島野ら 1998；小出・持田 2012）ため成長抑制との関係は明らかではない。最近になって水ストレスの実態解明が進んできたことから（上田ら 2016）、それと関連した成長抑制の影響の解明が望まれる。

V おわりに

丹沢のブナ林衰退要因として絞り込まれたオゾン、水ストレス、ブナハバチの3要因について、知見の集積が進み、ブナ林衰退の要因連関仮説（河野ら 2007；山根ら 2007a）が支持・補強され、複合作用による衰退機構について論考した。このため、とくに枯死・衰弱の進行によるギャップの拡大やシカ採食影響による林床植生の退行が進んだ地点では、各要因の作用が助長されることが強く示唆された。今後、現存するブナを保全するには、ギャップを閉鎖し、林床植生を回復させることにより、各種要因の影響を緩和する取り組みが必要となると考えられた。

VI 謝 辞

本研究は第3期ブナ林衰退機構解明プロジェクト（H24～28）に参画する愛媛大学、東海大学、桜美林大学、京都府立大学、酪農学園大学、北海道大学、神奈川県環境科学センターおよび農業技術センターとの共同研究で取り組みました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

VII 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.
- 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（2012）丹沢山地におけるブナ樹液流計測による蒸散と環境要因に関する検討．神奈川県自然環境保全センター報告 9：61-72.
- 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．（丹沢大山総合調査学術報告書．

- 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 396-399.
- 荒木眞之・佐々木長儀・本木 茂・岡上正夫 (1983) オゾン濃度減衰に及ぼす樹林の効果. 林業試験場報告 32 : 51-87.
- 藤森博英・末次加代子・池谷智志・小林俊元・永田幸志・羽太博樹・木佐貫健二 (2013) 神奈川県自然環境保全センター報告 11 : 27-36.
- Higashi T, Sohtome R, Hayashi H, Ohse K, Sugimoto T, Ohkawa Y, Tamura K and Miyazaki M (2003) Influences of forest decline various properties of soils on Mt. Hirugatake, Tanzawa Mountains, Kanto District, Japan. I. Changes in vegetation, soil profile morphology, and some chemical properties of soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 49: 161-169.
- 日野輝明・古澤仁美・伊藤宏樹・上田明良・高畑義啓・伊藤雅道 (2003) 大台ヶ原における生物間相互作用にもとづく森林生態系管理. 保全生態学研究 8 : 145-158.
- 堀田 庸 (1991) 酸性雨と関東地方のスギの衰退. 森林科学 1 : 11-18.
- 星直斗・山本詠子・吉川菊葉・川村美岐・持田幸良・遠山三樹夫 (1997) 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. (財) 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、神奈川県環境部). 175-257.
- 猪上信義・野田 亮・佐々木重行 (2002) 福岡県英彦山におけるブナ林の衰退現象と立地との関係. 九州森林研究 55 : 54-57.
- 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 : 60-77.
- 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 : A65-A77.
- 神奈川県環境部大気保全課 (1994) 酸性雨に係わる調査研究報告書. 神奈川県. 286pp.
- 小出 大・持田幸良 (2012) 太平洋側ブナ個体群の更新に与える冬季気温およびシカの影響. 日本森林学会誌 94 : 68-73.
- 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 29 : 27-34.
- 越地 正・山根正伸・藤澤示弘・齋藤央嗣・田村 淳・内山佳美・笹川裕史 (2005) 丹沢山地産ブナ苗に対する摘葉処理の影響. 第 56 回日本森林学会関東支部論文集 : 221-222.
- 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・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 3 : 11-24.
- 越地 正・相原敬次・山根正伸・田村 淳・谷脇 徹 (2012a) 丹沢山地におけるブナ林衰退の現状. 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 1-12.
- 越地 正・谷脇 徹・相原敬次・山根正伸 (2012b) 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. 神奈川県自然環境保全センター 9 : 95-104.
- 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. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 383-395.
- 松隈大亮・板橋秀一・鶴野伊津志・若松伸司 (2012) 丹沢山地における高濃度オゾンの広域移流現象の数値解析. 大気環境学会誌 47 : 173-178.
- 松井哲哉・田中信行・八木橋 勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋 潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境 14 : 165-174.
- 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・横井洋太・坂田 剛 (1999) 酸性降下物と生態系影響. 丹沢・檜洞丸におけるブナ林の枯損と酸性降下物. 環境科学会誌 12 : 241-250.
- Maruyama K and Toyama Y (1987) Effect of water stress on photosynthesis and transpiration in three tall deciduous trees. *Journal of Japanese Forest Society* 69: 165-170.
- 宮脇 昭・大場達之・村瀬信義 (1964) 丹沢山塊の

- 植生. (丹沢大山学術調査報告書. (財) 国立公園協会編. 神奈川県). 54-102.
- 桃澤邦夫 (1999) 三頭山ブナ林における昆虫被害とその影響について. 日本森林学会関東支部論文集 50 : 87-88.
- 永田幸志・藤森博英・池谷智志・末次加代子・小林俊元・栗林弘樹 (2013) 神奈川県におけるニホンジカの分布. 神奈川県自然環境保全センター報告 11 : 21-26.
- 永田幸志・田村 淳 (2014) 丹沢山地におけるササ3種の2013年の開花記録. 神奈川県自然環境保全センター報告 12 : 43-45.
- 永田幸志・田村 淳 (2015) 丹沢山地におけるササ3種の2014年の開花記録. 神奈川県自然環境保全センター報告 13 : 65-68.
- 梨本 真・高橋啓二 (1991) 関東甲信・関西瀬戸内地方におけるスギの衰退現象. 森林立地 32 : 70-78.
- 野澤彰夫 (2009) 栃木県におけるブナハバチによるイヌブナの食葉被害. 関東森林研究 60 : 221-223.
- 斎藤秀之・須藤 博・角張嘉孝 (2001) ブナ樹冠の大気飽差が光合成速度と気孔開閉に与える影響. 日本緑化工学会誌 26 : 178-187.
- 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 (2012a) 数値モデルを用いた丹沢山地のオゾンの挙動解析. 大気環境学会誌 47 : 217-230.
- 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 (2012b) 神奈川県丹沢地域の大気環境. 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 33-43.
- 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定. 大気環境学会誌 48 : 251-259.
- 斎藤正彦・齋藤央嗣・相原敬次・谷脇徹 (2016) 丹沢山地の風況解析. 神奈川県自然環境保全センター報告 14 : 33-36. (本特集)
- 関達哉 (2012) 短時間のオゾン (O₃) 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. 神奈川県自然環境保全センター 9 : 73-79.
- 島野光司 (1998) 何が太平洋型ブナ林におけるブナの更新をさまたげるのか?. 植物地理・分類研究 46 : 1-21.
- 清水英幸・伊藤祥子 (2013) ブナに及ぼす複合的なストレスの影響 (ブナ林の衰退—丹沢山地で起きていること—). 森林科学 67 : 14-17.
- Shinohara A, Vikberg V, Zinovjev A and Yamagami A (2000) *Fagineura crenativora*, a new genus and species of sawfly (Hymenoptera, Tenthredinidae, Nematinae) injurious to beech trees in Japan. *Bulletin of the National Science Museum*, Tokyo, Ser. A 26: 113-124.
- 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.
- 鈴木 透・山根正伸 (2013) 空中写真からわかるブナ林の衰退 (ブナ林の衰退—丹沢山地で起きていること—). 森林科学 67 : 6-9.
- 鈴木 透・谷脇 徹・山根正伸 (2016) 衰退リスクから見たブナ林の再生優先地マップの作成. 神奈川県自然環境保全センター報告 14 : 75-80. (本特集)
- 高橋啓二・梨本 真・植田洋匡 (1991) 関西・瀬戸内地方におけるスギ衰退とオキシダント指数, 降雨量との関係. 環境科学会誌 4 : 51-57.
- 高橋啓二・沖津 進・植田洋匡 (1986) 関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性. 森林立地 28 : 11-17.
- 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*) 苗に及ぼす影響. 大気環境学会誌 42 : 107-117.
- 田村 淳 (2007) ニホンジカの採食圧を受けてきた冷温帯自然林における採食圧排除後10年間の下層植生の変化. 森林立地 49 : 103-110.
- 田村 淳 (2008) ニホンジカによるスズタケ退行地において植生保護柵が高木性樹木の更新に及ぼす効果. 日本森林学会誌 90 : 158-165.
- 田村 淳 (2010) ニホンジカの採食により退行した丹沢山地冷温帯自然林における植生保護柵の設置年の差異が多年草草本の回復に及ぼす影響. 保全生態学研究 15 : 255-264.
- 田村 淳 (2013) シカによりスズタケが退行したブナ林において植生保護柵の設置年の差異が林床植生の回復と樹木の更新に及ぼす影響. 日本森

- 林学会誌 95 : 8-14.
- Tamura A (2016) Potential of soil seed banks in the ecological restoration of overgrazed floor vegetation in a cool-temperate old-growth damp forest in eastern Japan. *Journal of Forest Research* 21: 43-56.
- 田村 淳・藤森博英・末次加代子・永田幸志 (2013) 丹沢全域の相対的な植生指標としての植生劣化レベルと林床植被レベル. 神奈川県自然環境保全センター報告 11 : 37-43.
- 田村 淳・入野彰夫・勝山輝男・青砥航次・奥津昌哉 (2011) ニホンジカにより退行した丹沢山地の冷温帯自然林における植生保護柵による希少植物の保護状況と出現に影響する要因の検討. 保全生態学研究 16 : 195-203.
- 田村 淳・越地 正・山根正伸・藤澤示弘・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. 第 56 回日本森林学会関東支部論文集 : 127-130.
- 田村 淳・谷脇 徹・井田忠夫・中西のりこ・吉田直哉 (2016) 植生保護柵を用いた丹沢のブナ等冷温帯森林の再生一天然更新と植栽の試験から一. 神奈川県自然環境保全センター報告 14 : 67-73. (本特集)
- 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. 東海大学総合教育センター紀要 28 : 35-61.
- 谷 晋・伴野英雄・山上 明 (2009) ブナハバチの卵期および幼虫期における温度と発育速度の関係. 東海大学総合教育センター紀要 29 : 107-113.
- 谷 晋・伴野英雄・山上 明 (2012a) 丹沢山地におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への食害状況の経年変化 (2008-2011). 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 91-94.
- 谷 晋・伴野英雄・山上 明 (2014) 神奈川県丹沢山地におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への食害状況 (2013 年). 東海大学総合教育センター紀要 34 : 159-162.
- 谷 晋・伴野英雄 (2016) 丹沢山地におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への食害発生状況 (2014-2015). 神奈川県自然環境保全センター報告 14 : 37-40. (本特集)
- 谷 晋・山上 明・伴野英雄 (2012b) ブナハバチ雌の前蛹期における休眠期間. 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 105-109.
- 谷脇 徹 (2014a) ブナハバチ成虫の生存と卵生産に及ぼす温度および食物の影響. 昆虫 (ニューシリーズ) 17 : 1-7.
- 谷脇 徹 (2014b) ブナハバチ成虫で観察されたブナ樹液摂取行動. 日本環境動物昆虫学会誌 25 : 147-151.
- 谷脇 徹 (2015) 丹沢山地におけるブナハバチの大量発生と防除法の開発. 森林防疫 710 : 165-173.
- 谷脇 徹・田村 淳・藤澤示弘・齋藤央嗣・越地正 (2006) 丹沢山地において 2006 年に落下したブナ種子の品質. 神奈川県自然環境保全センター報告 5 : 79-84.
- 谷脇 徹・渡辺恭平 (2012) 神奈川県丹沢山天王寺尾根で確認されたブナハバチの捕食寄生蜂相. 昆虫 (ニューシリーズ) 15 : 2-14.
- 谷脇 徹・山根正伸・伴野英雄・谷 晋・山上 明 (2014) ブナハバチの繭形成期の死亡に及ぼす土壌条件の影響. 環動昆 25 : 75-80.
- 谷脇 徹・山根正伸・田村 淳・相原敬次・越地正 (2012) 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. 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 81-89.
- 谷脇 徹・山根正伸・田村 淳・相原敬次・越地正・谷 晋・伴野英雄・山上 明 (2013) ブナハバチ雌成虫の発生とブナ展葉の同時性が被食量に及ぼす影響. 昆虫 (ニューシリーズ) 16 : 218-224.
- 戸塚 績・青木正敏・伊豆田 猛・堀江勝年・志磨克 (1997a) 気象と大気. 檜洞丸山頂における南斜面ブナ衰退地と北斜面ブナ健全地の気象条件比較. (丹沢大山自然環境総合調査報告書. (財) 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. 神奈川県環境部). 89-92.
- 戸塚 績・青木正敏・伊豆田 猛・堀江勝年・志磨克 (1997b) 気象と大気. ブナ衰退地と健全地の葉の生理活性、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. (丹沢大山自然環境総合調査報告書. (財) 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. 神奈川県環境部). 99-102.
- 上田明良・小坂 肇・高畑義啓・矢部恒晶 (2014) 平成25年の九州地域の森林病虫獣害発生状況. 九州の森と林業 108: 4-5.
- 上田正文 (2016) 神奈川県丹沢山地に生育するブナの水分生理状態. 日本森林学会学術講演集 127: 146.
- 若松伸司・斎藤正彦・神田 勲・岡崎友紀代 (2013) ブナ林の大気環境 (ブナ林の衰退—丹沢山地で起きていること—). 森林科学 67: 10-13.
- 渡辺 誠・山口真弘 (2011) 日本の森林樹種6種に対する窒素沈着を考慮したオゾンのリスク評価. 日本生態学会誌 61: 89-96.
- 山上 明・谷 晋・伴野英雄・篠原明彦 (2001) ハチが森を食い荒らす?—ハバチ類の大発生、最近の話題. 国立科学博物館ニュース 382: 4-7.
- 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. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 256-268.
- 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. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 703-710.
- 山根正伸・藤澤示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・中嶋伸行・齋藤央嗣 (2007b) 丹沢山地における最近の気象の特徴. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 375-382.
- 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 (2007c) 丹沢山地のブナ林の現況—林分構造と衰退状況—. (丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編. (財) 平岡環境科学研究所). 479-484.
- 山根正伸・鈴木 透 (2012) 丹沢山地におけるブナ衰退の時空間的特性. 神奈川県自然環境保全センター報告 9: 13-21.
- 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關係の検討. 景観生態学 13: 5-13.
- Yonekura T, Honda Y, Oksanen E, Yoshidome M, Watanabe M, Funada R, Koike T and 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. Journal of Japanese Atmospheric Environment 36: 331-351.
- Yonekura T, Yoshidome M, Watanabe M, Honda Y, Ogiwara I and Izuta T (2004) Carry-over effects of ozone and water stress on leaf phenological characteristics and bud frost hardiness of *Fagus crenata* seedlings. Trees 18: 581-588.
- 吉田文夫・生出智哉・児玉規子・乙咩啓太郎 (1997) 蘚苔類・地衣類. (丹沢大山自然環境総合調査報告書. (財) 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・神奈川県環境部). 559-564.

神奈川県丹沢地域における大気中オゾンの動態

大森成晃*・神田 勲*・相原敬次**・齋藤央嗣**・岡崎友紀代*・若松伸司*

Behavior of atmospheric ozone in the Tanzawa region of Kanagawa prefecture

Naruaki OMORI*, Isao KANDA*, Keiji AIHARA**, Hiroshi SAITO**,
Yukiyo OKAZAKI* and Shinji WAKAMATSU*

要 旨

大森成晃・神田 勲・相原敬次・齋藤央嗣・岡崎友紀代・若松伸司：神奈川県丹沢地域における大気中オゾンの動態 神奈川県自環境科学報告 14 : 13-25, 2016 丹沢山地のブナ林衰退の原因の1つと推測されているオゾンについて、2012年3月より4箇所の山頂付近において連続測定を実施した。また小型オゾン計を用いた山道の徒歩移動観測を実施し、従来研究よりも高標高域における高密度なデータを収集した。連続測定では、従来研究と同様な日変動、季節変動が確認され、4箇所の山頂付近におけるオゾン濃度変動は多くの場合で類似していた。なお、丹沢山地では夏季の夜間に濃度ピークが頻繁に観測され、西丹沢の菰釣山では東丹沢の丹沢山よりも濃度ピークが数時間程度遅れて起こっていた。徒歩移動観測では、午前中に檜洞丸の山頂付近の尾根線を西から東に交差する際に、オゾン濃度上昇、温位上昇、相対湿度下降が同期して起こることが複数回確認された。

キーワード：オゾン、植物影響、AOT40、移動観測、山岳地域

I 背 景

1 オゾン研究の目的

オゾン (O_3) は、主として大気中で生成される気体である (オゾンの一般的な性質については Seinfeld & Pandis, 2006 や酸性雨研究センター, 2005 を参照)。対流圏中では、燃焼過程で排出される一酸化窒素 (NO) が酸化されてできる二酸化窒素 (NO_2) の紫外線による光分解に始まる一連の化学反応が主な生成プロセスである。オゾンは大気中化学反応や固体壁における分解反応によって消滅するが、揮発性有機化合物 (VOC) が反応過程に加わると化学反応によるオゾンの消滅速度を抑制する方向に働き、オゾン濃度が上昇する。オゾンの地表付近

の大気中における典型的な一時間平均濃度は数から百数十ppbである。大気中寿命は1週間から1ヶ月のオーダーであり、夏季に短く冬季に長い。

オゾンは酸化性が強く、多くの大気中化学反応において重要な役割を果たす。例えば、二酸化硫黄 (SO_2) や NO_2 は、オゾン生成に伴う OH ラジカルなどにより酸化され、硫酸や硝酸になり、さらに大気中の主要塩基性ガスであるアンモニアと結合して、硫酸塩、硝酸塩といった微小粒子になる。この過程には2つの側面がある。 SO_2 や NO_2 は人間の呼吸器に悪影響を及ぼすが、オゾンはそれらを除去する働きをしている。一方、微小粒子は沈降速度が小さいため大気中に長時間滞在し、視程障害を起こしたり、毒性物質のキャリアとなったりする。

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

** 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 厚木市七沢 657)

オゾン自身は様々な形で私達の生活に影響を及ぼすことが知られている。人間に対しては、眼や咽喉などの粘膜に刺激を与えるため、高濃度時には涙が出たり喉が痛くなったりする。また、多量のオゾンが植物の気孔から取り込まれると、オゾンの強い酸化力により組織が傷められたり、光合成速度が低下したりする。また、オゾンは波長約 $10\mu\text{m}$ の赤外線を強く吸収し、温室効果を示す。オゾンの温室効果能は二酸化炭素、メタンについて3番目である。

産業革命前と比べると、非都市域におけるオゾンの背景濃度は36%上昇している (IPCC, 2001)。先進国の都市域においては、1960 から 1980 年ころに高いオゾン濃度が記録されたが、その後、窒素酸化物 ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) や VOC の排出量削減が進み、都市域のオゾン濃度は大幅に減少した。ところが、近年、主に北半球において対流圏のオゾン濃度 (都市域、非都市域を含む年平均値) が徐々に増加している。原因として気温の上昇や発展途上国における大気汚染物質排出量の急増が挙げられている。このような平均的なオゾン濃度の増加は、植物の成長阻害や地球温暖化のような慢性影響において深刻な問題である。

2 森林影響に関する従来研究

オゾンの樹木に対する影響は、苗木を対象とした制御実験において良く理解されている。例えば、日本のアカマツ、ストロブマツ、ブナ、トウカエデ、トネリコの場合、6ヶ月間にオゾン濃度が40ppbを超過した時間に超過分を掛けたものを積算した値AOT40 (Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40ppb) が、12-21ppmhであると固体乾重量が10%低下する (伊豆田・松村 1997)。

また、オゾンは間接的に樹木に悪影響を及ぼすことが知られている。酸性霧は樹木の成長を阻害する要因の1つであるが、酸性霧の原因である硫酸や硝酸はオゾンが介在して SO_2 や NO_2 が酸化されてできたものである (Shigihara *et al.*, 2008, 2009; 井川・大河内 2009)。これは大気汚染物質の発生源に比較的近い場所での関与であるが、森林地帯へ輸送されたオゾンに関わる間接影響もある。オゾンはオレフィン系炭化水素と反応して過酸化水素 (H_2O_2) を生成する。過酸化水素は植物に対して強い毒性を示し、樹木はオレフィンであるテルペン類を多く排出する。実際、奥日光における観測では、オゾン濃

度と過酸化水素水濃度の間に高い相関があった (畠山 2003)。

ヨーロッパや北米では1970年代後半から森林衰退が観察され、多くのケースにおいてオゾンの関与が指摘されている (河野 2004; Karnosky *et al.*, 2007; Matyssek and Innes, 1999; Bytnerowicz *et al.*, 2004; Paoletti, 2006)。これらの研究の背景には、高濃度の場合に植物に悪影響を及ぼす SO_2 や NO_2 の濃度が大幅に減少している一方で、対流圏オゾン濃度が停滞または増加していることがある。なお、森林の盛衰には多様かつ複雑な要因が関係しており (Bytnerowicz *et al.*, 2007)、樹種や地域ごとの環境によって要因の影響度が異なるため、欧米における知見がそのまま日本に当てはまるとは限らない。

日本においては、例えば奥日光におけるダケカンバ (伊豆田 2004)、奥秩父におけるシラビソ (伊豆田 2004)、丹沢山地におけるモミやブナの衰退 (相原 2004) が知られている。これら森林地帯においては、オゾン濃度が樹木に悪影響を及ぼし得るほど高く、オゾンの影響が示唆されている。

本研究で対象としている丹沢山地では、1960 - 1970 年ころに大山のモミが急速に枯損し、1970 - 1980 年ころに丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸の山頂付近を中心にブナが枯損し始め、現在も進行中である (越地ら, 1996)。衰弱の原因として、オゾン、気象条件、樹木の老齢化、水ストレス、風ストレス、酸性霧、ブナハバチやシカによる食害などが検討されてきた (Suto *et al.*, 2008; 神奈川県環境部 1997; 平岡環境科学研究所 2007; 神奈川県自然環境保全センター 2012)。現在では、これらの要因の複合影響による衰弱と見るのが一般的であるが、本稿ではオゾンに焦点を当てて行った研究を報告する。

3 愛媛大学グループによる従来研究

著者らの属する愛媛大学農学部大気環境科学研究室では、丹沢山地および周辺におけるオゾンの動態を中心とした調査・研究を行ってきた (斎藤ら, 2012)。その概要を以下に列挙する。

・丹沢山地周辺のアメダス局における1978-2007年の気温を解析した結果、2-3月および9-10月の気温上昇率が他の月よりも高いことがわかった。これは、夏が長く、冬が短くなっていることを示している。夏が長くなると着葉期も長くなり、オゾンへの

曝露量が多くなる。

- ・ブナの着葉期である4-9月のAOT40は、西丹沢犬越路局（以下、犬越路局）において、2004-2010年の間、30ppmhを越えており、ブナの成長阻害が示唆された。

- ・後方流跡線解析により、犬越路局においてオゾン濃度が100ppb以上となる日は、空気塊の起源が東京周辺にあることが多かった。

- ・オゾンゾンデによるオゾン濃度の鉛直分布測定を2009年8月（足柄上地域県政総合センター）、2010年3月、2010年7月、2011年10月（いずれも神奈川県自然環境保全センター）に実施した。2009年8月と2010年7月の観測では、海拔1000mあたりにオゾン濃度の極大が見られることがあり、東京周辺からの海風による輸送が示唆された。

- ・自動車にオゾン計を積載し、丹沢山地内の林道沿いでオゾン濃度分布を測定した（岡崎ら，2010）。その結果、山地内の南側が北側よりも濃度が高い場合が多かった。

- ・大気化学輸送モデル（MM5 + CMAQ）によってオゾンの生成、輸送、消滅過程を調べた（斎藤ら，2012b）。平地測定局および犬越路局における濃度変動、及び、2010年7月のオゾンゾンデ測定結果と良好な一致を得た。また、犬越路局におけるオゾン濃度の日較差が小さい原因として、日中生成量が小さいこと、日中の乾性沈着が大きいこと、夕方に海上起源の低オゾン気塊の侵入が弱いことが挙げられた。

- ・大気化学輸送モデル（WRF-Chem）と拡散モデル（FLEXPART）によって、丹沢山地で日中高濃度となる場合の空気塊の起源を調べた（松隈ら，2012）。その結果、都市部から排出され相模湾に流入したNO_xやVOCが光化学反応によりオゾンを生成し、オゾン濃度の高くなった気塊が海風によって丹沢山地に運ばれることがわかった。関東地方を覆うような大規模な海風の場合は、丹沢山地の南方から輸送され、相模湾からの小規模な海風の場合は、南東方向から輸送される傾向があった。

- ・大気化学輸送モデル（MM5 + CMAQ）によって、2010年4-10月の7ヶ月間のシミュレーションを行い、丹沢山地および周辺の積算オゾン暴露量の分布を求めた（斎藤ら，2013）。積算オゾン暴露量としてAOT40とPOD1（accumulated Phytotoxic Ozone Dose with a threshold $y=1$ ）を比較し、POD1が気

孔開閉の温湿度依存性を考慮していることなどから、より有用な指標であることを示した。

II 定点観測データ解析

1 意義・目的

丹沢山地におけるブナ衰退は標高1000m以上において顕著に見られる。したがって、オゾンの影響を評価するためには、標高1000m以上における測定データが必要である。丹沢山地においては、山地中央部の犬越路局においてオゾンを含む大気中微量物質の濃度が2004年からほぼ連続的に観測されてきたが、犬越路局の標高は935mであり、周辺のブナの枯損はあまり顕著ではない。

そこで本研究では、山頂付近の気象要素とオゾン濃度から、オゾンの動態を把握した。

2 方法

神奈川県では、2012年3月より、丹沢山、檜洞丸、鍋割山、菰釣山の山頂付近に測定局を設置・運用してきた（図2-1）。太陽電池による電源供給システムにより稼動し、月1回程度のメンテナンス（測器交換、校正など）を行っている。測定項目は、気象要素（風速、風向、気温、湿度、雨量、日射量、地温）、および、オゾン濃度である。オゾン濃度は、丹沢山、檜洞丸の2地点では、Dylec社1150オゾン計による測定が行われてきたが、菰釣山と鍋割山では、2014年夏、2015年秋の短期間のみ、小型オゾン計（2B technologies社Model202、または、106）を用いた測定を試みた。この小型オゾン計は、DC12Vで稼動するため低容量の電源システムでも運用可能であり、また、軽量であるためメンテナンスのための運搬が容易である。すでに米国の山岳地帯における観測が報告されている（Burley and Ray, 2007; Burley and Bytnerowicz, 2011; Burley *et al.*, 2014）。測定データは、局設置当初からのデータは10分間の平均値（10分値）として連続的に記録されており、小型オゾン計を使用した2014年夏データは10秒値、2015年秋データは5分値として記録された。なお、表2-1に示すように2015年秋の小型オゾン計による観測データについては有効測定データ期間が短かったため、本稿では詳細な結果の記載を省いた。



図 2-1 丹沢山地測定局と周辺常時監視測定局
(左下枠囲みは、中央付近の鳥瞰図)

3 連続測定データ

山地の連続測定には、落雷、豪雨等に起因する測定機器の故障により、欠測期間が生じている。表 2-1 にオゾン濃度の有効データ期間を示した。なお、Dylec1150 のデータは一日に 1 時間値 (1 時間平均値；1 時データ = 0:00 ~ 1:00 の平均値) が 20 個以上得られた日を有効測定日として、有効データ期間を求めた。小型オゾン計による短期観測は設置日から撤去日までを示した。

図 2-2 に丹沢山、檜洞丸、犬越路の 3 地点において 2012 年度に観測されたオゾン濃度一時間値を示した。丹沢山、檜洞丸の濃度変動は振幅、タイミングともにほぼ同じであった。標高の低い犬越路でも山頂 2 地点の変動に同期していることが多かったが、異なる変動も散見され、特に夜間に数 ppb 程度犬越路のほうが濃度が低くなっていることが多かった (図 2-4 参照)。図 2-2 から①の 4 ~ 6 月後半までは 20ppb を下回ることがなく、春に濃度レベルが高いことが分かる。②の 7 月中旬から 9 月上旬にかけては頻繁に 20ppb を下回ることがあり、平均的な濃度は低い変動が激しく、最大値は濃度レベルの高い 5 月と同じく 100ppb 程度であった。③、④の 10 ~ 2 月ではほとんどが 20 ~ 60ppb の間に収まっており、夜に低く昼に高い日変化はしているが、他月と比較すると濃度変動が小さかった。また、④の 1 月途中からは緩やかに濃度レベルが上昇し、3 月からは徐々に濃度変動が大きくなっていた。

図 2-3 に、菰釣山で連続測定を行った 2014 年 8 月 1 日から 9 月 5 日までのオゾン濃度を示す。菰釣山、丹沢山、檜洞丸の 3 地点は 10 分値、近隣一般局データは一時間値である。これまで檜洞丸と丹沢

山におけるオゾン濃度は、ほぼ同じ値で推移することがわかっているが、今回の観測から菰釣山についても、檜洞丸、丹沢山とほぼ同じ変動を示すことがわかった。しかし、オゾン濃度が 60ppb 以上の濃度に注目すると、平地の一般局で 60ppb を超過したのは 13 日に対し、山地で 60ppb を超過したのは 8 日であったが、菰釣山において、オゾン濃度が 60ppb 以上となったのは 9 月 3 日を除き夜間に起こっており、昼間は小さなピークしか観測されなかった。また、丹沢山と菰釣山の 10 分値を比較すると、8 月 2 日、8 月 8 日のピークなど、菰釣山の濃度変動が丹沢山から数時間程度遅れて生じている場合もあった。これらの挙動は、人口密集地域において朝から昼すぎに地上付近で生成され、1-2km 厚の対流混合層に広がったオゾンのうち、消滅速度が小さい上空空間を西 ~ 北方向に輸送されたものが山地に到達するという機構と整合している。

4 日変動

丹沢山地および周辺地域におけるオゾン濃度の日変動については、過去の研究においてすでに解析されている。河野ら (2007) は、檜洞丸において 2004 年 8 月から 2006 年 7 月の 2 年間にわたり連続測定を実施し、犬越路局、伊勢原市役所局におけるデータとの比較を行った。その結果、オゾン濃度の最大値は平地の方が高いが、年平均値では丹沢山地の 2 地点が平地の約 2 倍であった。また、季節別にオゾン濃度の日変動を調べた結果、年間を通して、標高が高い地点ほど日変動の振幅が小さくなり、最も標高の高い檜洞丸では冬季に日変動がほとんどみられなかった。なお、いずれの地点においても春の濃度が最も高かった。斎藤ら (2012) も、犬越路局でのオゾン濃度の日変動が平地の測定局と比較的小さく、日中にオゾン濃度が上がらず、夜間にオゾン濃度が下がる特徴があると指摘している。斎藤ら (2012) は、大気化学輸送モデル CMAQ のプロセス解析機能を用いて、その原因を解析している。

図 2-4 は丹沢山、檜洞丸、犬越路の丹沢山地 3 地点と神奈川県常時監視測定局のうち一般局 (59 局) の 2012 年度の年平均オゾン濃度の日変動である。

以前の研究で示されていたのと同様に、濃度変動はどの地点においても朝に最小、昼すぎに最大となっており、標高の高い地点ほど日較差が小さくなっていた。今回の調査で、丹沢山と檜洞丸の 2 地

表 2-1 丹沢山地測定局のオゾン有効データ期間とオゾン測定器機種

地点	オゾン有効データ期間	備考
丹沢山	2012年 4/1~4/7、4/9~6/19、6/22、6/25~7/16、7/21~9/10、9/12~11/4、11/6~12/31	Dylec1150
	2013年 1/1~1/23、1/25~3/26、3/28~8/10、11/6~11/12、11/14~12/3、12/5~12/31	Dylec1150
	2014年 1/1~3/15、3/18~4/28、4/30~5/19、6/5~10/24、10/31~11/2、11/6、11/12~12/3、12/5~12/31	Dylec1150
	2015年 1/1~6/11、6/14~7/19、7/21~8/16、8/19~11/30	Dylec1150
檜洞丸	2012年 4/20~6/19、6/22~7/16、7/21~8/5、8/8~11/4、11/6~12/31	Dylec1150
	2013年 1/1~2/11、2/14~3/5、3/8~3/26、3/29~8/14、8/17~10/31、11/2~11/4、11/6~12/2	Dylec1150
	2014年 5/31~7/31、8/21~11/3、11/5~11/30、12/2~12/3、12/5~12/31	Dylec1150
	2015年 1/1~3/2、3/31~7/25、7/27~8/1、8/4~8/6、8/8~9/4、11/12~11/30	Dylec1150
鍋割山	2015年 8/24~9/8、9/16~10/6	2B202
菰釣山	2015年 10/1~11/17	2B202
	2014年 8/1~9/5	2B202
	2015年 9/2~9/3	2B106

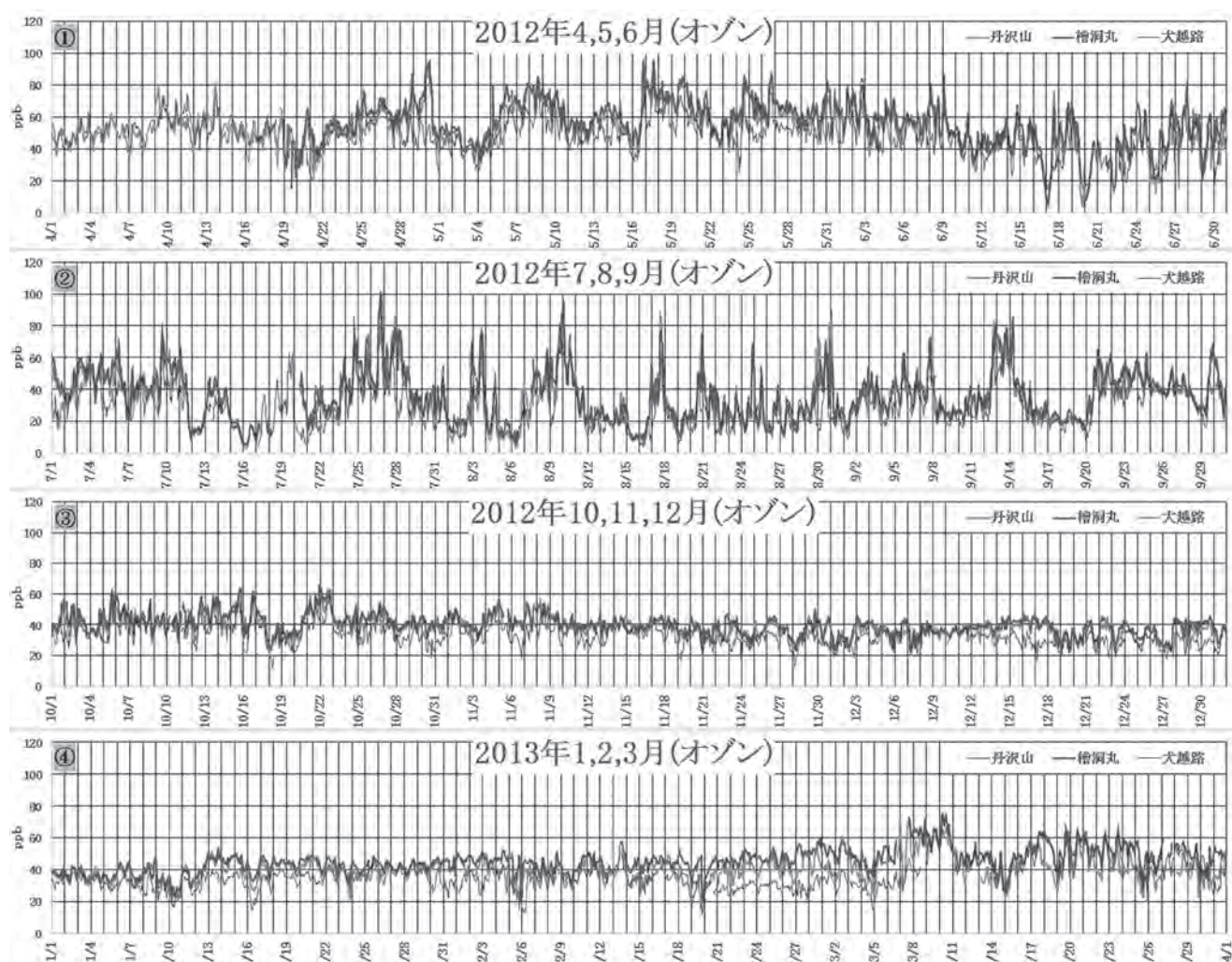


図 2-2 2012 年度丹沢山地のオゾン濃度 1 時間値

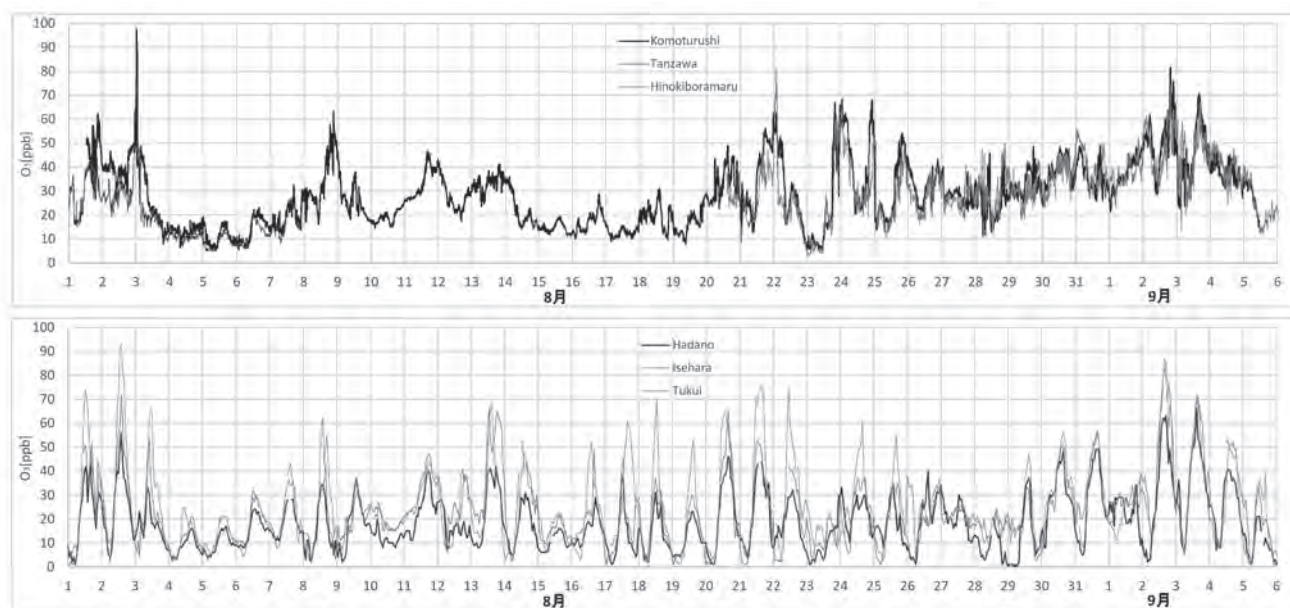


図2-3 2014年8月1日から9月5日の丹沢山地オゾン濃度（菰釣山、丹沢山、檜洞丸＝10分値、上）と周辺一般局（秦野、伊勢原、津久井＝1時間値、下）におけるオゾン濃度

点では年間平均日変動はほぼ同じとなっていることが分かった。また、日内の最大、最小となる時刻が神奈川県一般局、犬越路、丹沢山・檜洞丸の順になっており、山地のオゾンは平野部からの移流の影響を受けて変動していることが示唆された。

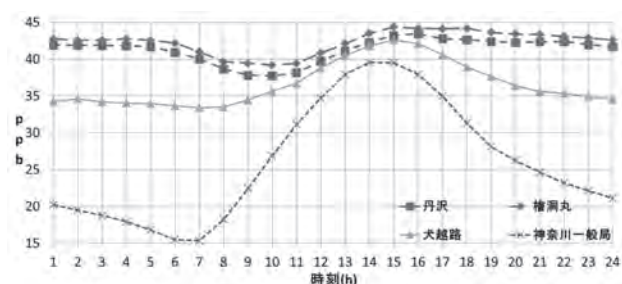


図2-4 2012年度丹沢山地と神奈川県常時監視測定局の年平均オゾン日変動

5 月変化

季節変化については、河野ら（2007）の他に、2004年および2005年の4月から9月まで拡散型パッシブサンプラーを用いた調査結果が過去に報告されている（阿相ら，2007）。この研究では、丹沢山地では周辺一般局と同様にオゾン濃度は春に高く、夏にかけて低くなると報告されている。

図2-5に、2009年4月から2015年3月の月平均オゾン濃度を示す。月変化は毎年ほとんど同じ形となっていることが分かる。山のオゾン濃度が最大になるのは平野部と同様に5月頃であるが、最小は地上が12月であるのに対して山は7,8,9月の夏に最

小となるため、地上との濃度の差が6,7月頃の初夏に小さくなり、12月に差が大きくなっている。

6 他の国設酸性雨局などとの比較

これまでの研究では丹沢山地内または丹沢山地周辺の常時監視測定局との比較しか行われてこなかった。ここでは、国設酸性雨局との比較を行い、丹沢山地における特徴を明らかにする。なお、国設酸性雨局は都市域には3地点ほどであり、丹沢山地と同じく汚染物質の発生源が少ないと考えられる岬や山、島などの遠隔地に多く設置されており、比較的高標高に位置する測定局が多い。また、国設酸性雨局は都市、田園、遠隔の3つに分類される。

図2-6に丹沢山と国設酸性雨局の各カテゴリから選抜した地点の2012年度の平均日変化を示す。丹沢山や赤城と尼崎を比較すると、山では最小・最大となる時刻は都市部より1～3時間程度遅いことが分かる。これは山のオゾン濃度は近くの都市域からの移流を受けて変化しているためであると考えられる。小笠原のような周囲からの人為的影響がほとんどないような場所では日変化はなくほぼ一定の濃度を保っていることが確認された。山や遠隔地などで都市域と比較して夜間の濃度減少が小さくオゾンの日変化量が小さい理由としてNOの排出量が少ないことが考えられる。

図2-7に、2012年度の丹沢山地の3地点と国設酸性雨局の高標高3地点（標高750m以上）のオゾ

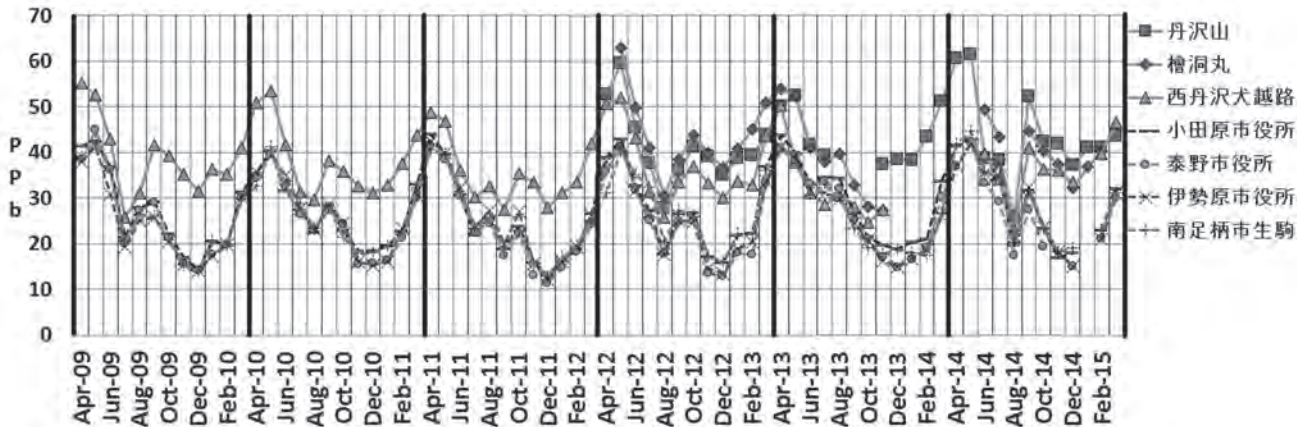


図 2-5 丹沢山地と周辺常時監視測定局の月平均オゾン濃度変動

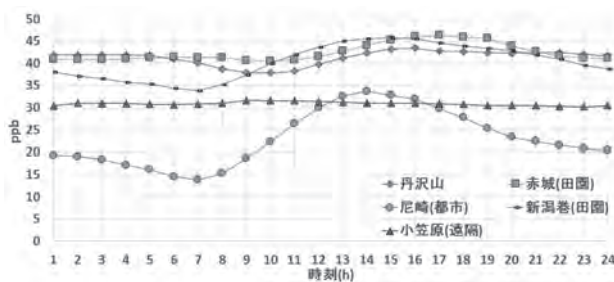


図 2-6 丹沢山と国設酸性雨局の 2012 年度平均日変化

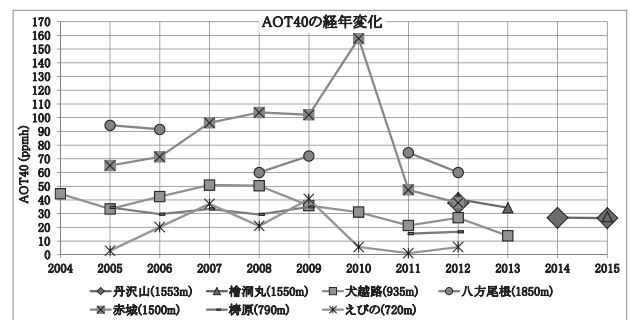


図 2-8 丹沢山地と国設酸性雨局の AOT40 の経年変化

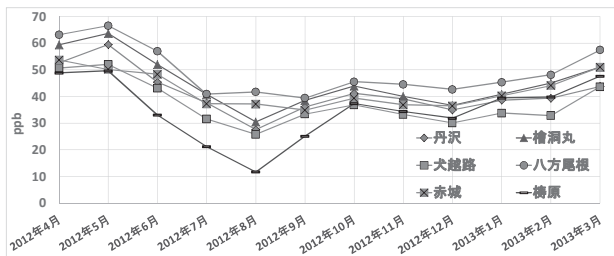


図 2-7 丹沢山地と国設酸性雨局の 2012 年度月平均値

ン濃度月平均値の変動を示す。全地点でオゾン濃度は春に最大、夏に最小となっている。また、八方尾根と赤城の 2 地点は丹沢山地の 3 地点と比較すると、春から夏にかけてのオゾン濃度の減少幅が小さく、逆に梶原では大きいことが分かる。夏の濃度低下の違いは、太平洋上からの低濃度オゾン気塊移流の影響度の違いを反映しているものと考えられる。

図 2-8 に、丹沢山地と国設酸性雨局（標高 700m 以上）の 4-9 月の AOT40（有効測定データが 80% 以上）の経年変化を示した。全体的な傾向としては 2009 年頃以前よりも、以後の方が AOT40 値が低い。高標高に位置する赤城、八方尾根では AOT40 の値が特に大きく一時は 100ppmh 前後と非常に大きな値となっていたが、2012 年には赤城は 40ppmh、八方尾

根は 60ppmh まで減少している。丹沢山、檜洞丸については、2012 年に、同程度の標高に位置し首都圏周辺の山地局である赤城と近い値となっていること、および、犬越路の経年変化から、この 2 地点でも 2008 年頃には 80ppmh に近い値をとっていたのではないかと推測できる。丹沢山地の AOT40 は、近年、20-30ppmh の範囲で緩やかに変化しているが、4-9 月の AOT40 が 10-21ppmh でブナ苗木の固体乾重量が 10% 低下するという報告があり（伊豆田・松村, 1997）、より低い曝露量になるよう改善する必要がある。

7 風向依存性とオゾン濃度の関係

2012 年度の丹沢山、檜洞丸、犬越路の 3 地点について月ごとに風向別平均オゾン濃度を求めた。図 2-9 に結果を示す。丹沢山では、5 月に濃度が高く、西風のときわずかに高い傾向があった。7～9 月の夏季では、北よりの風のときは 40ppb 以上であるのに対し、南よりの風のときは 20ppb 未満となっていた。北よりの風のときにオゾン濃度が高くなる傾向は、6 月頃から現れている。夏以外の期間はオゾン濃度の風向依存性は小さかった。檜洞丸においても、

夏は北よりの風のとき濃度が高くなっており、その他の期間では風向による濃度差は小さかった。丹沢山と檜洞丸では、夏季の強い海風によって関東内陸部に生じた高濃度オゾン気塊が、夜間に陸風によって南に向かって輸送されるために、北風が吹くときにオゾン濃度が高くなったと考えられる。

犬越路でも6～9月の夏以外の期間では他地点と同様にオゾン濃度の風向との関係は小さかった。夏は、丹沢山・檜洞丸と異なり、南よりの風のとき濃度が高かった。犬越路では、他地点よりも標高が低く、昼間に南風、夜に北風が吹くという傾向がはっきりしているため、南側に位置する平野部のオゾン日変化を反映したものと考えられる。

山地の風向風速計はプロペラ式のものが地上5mの高さに設置されている。山頂または稜線では、山

肌を登る風が複数方向から集まる場所であり、風速風向の時間空間変動は極めて激しい。実際、近傍の樹々に吹く風と風向風速計に当たっている風が全く異なっていることが頻繁に目視で確認されている。山岳地において信頼性と代表性の高い風向風速の観測は、今後の課題である。

Ⅲ 徒歩移動観測

1 意義、目的

丹沢山、檜洞丸の2地点におけるオゾンの連続測定によって、山頂付近のオゾンの挙動の理解が進んでいる。しかし、ブナ枯れの分布は一様ではなく、オゾンの影響評価を精度よく行うためには、より高密度に丹沢山地全体のオゾン濃度分布を把握する必

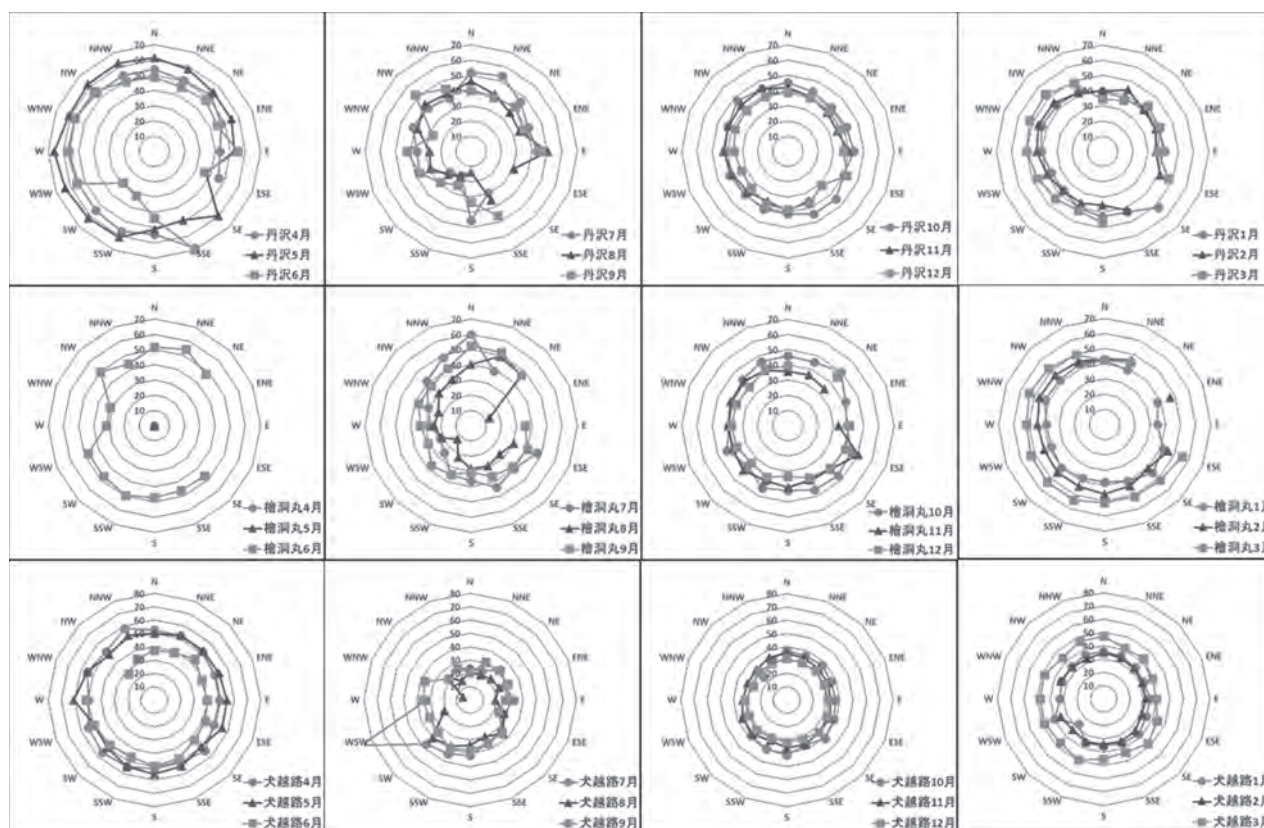


図 2-9 2012 年度丹沢山地測定局の風向別平均オゾン濃度

表 3-1 徒歩移動観測実測日

年月日	主な経由山頂	天候	備考
2014年5月30日	檜洞丸	快晴	
2014年8月1日	菰釣山	晴れ	2B202の設置のため、登山時のみの観測
2014年9月5日	菰釣山	雨→晴れ	2B202の回収のため、下山時のみの観測
2014年9月29日	菰釣山	晴れ	
2014年10月3日	塔の岳、丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸	晴れ	風が強かった
2015年6月24日	檜洞丸	晴れ、時々曇り	
2015年9月2日	菰釣山、城ヶ尾山、畦ヶ丸	雨→曇り、時々霧	本観測から背負子を使用
2015年10月1日	鍋割山	雨	爆弾低気圧による大荒れの天候で風も強かった。
2015年10月21日	檜洞丸	曇り、時々霧	

要がある。解決策として、オゾン連続測定局を多くの地点に設置することが考えられるが、設置やメンテナンスのコストを考慮すると現実的ではない。そこで、代替法として、山地内を移動しながらの観測を行った。この方法では、時間的には特定断面になるが、高密度に広い範囲の濃度分布を把握することができるため、地形影響などを推測する上で貴重な情報が得られる。これまで、林道を利用した自動車移動観測を複数回実施してきたが（岡崎ら，2010）、山頂に近い高標高域の情報が得られていなかった。そこで、小型オゾン計を携帯して登山道を移動観測することにより、麓から山頂までの詳細な濃度分布を測定した。

2 観測方法

以下の測定機器を図 3-1 のように背負子に取り付け、登山道を歩行することにより観測を行った。

- ・小型オゾン計（2BTechnologies 社 Model202）
- ・充電電池
- ・気温・気圧計（T&D 社 TR-73U；サーミスタセンサーを強制換気遮光二重通風筒に挿入）
- ・湿度計（T&D 社 TR-77Ui；静電容量式センサーを遮光通風箱に挿入）
- ・GPS ロガー（ibblue747pro）



図 3-1 移動観測機器一式

3 観測結果

表 3-1 に丹沢山地において実施された徒歩移動観測の実施日と主な経由山頂を示す。全 9 回のうち、特徴的な結果が得られた観測結果を紹介する。

(1) 檜洞丸移動観測

檜洞丸を主な目的地とした移動観測は 2014 年 5 月 30 日、2015 年 6 月 24 日、2015 年 10 月 21 日の

3 回実施された。

図 3-2、図 3-3 に 2014 年 5 月 30 日の観測結果を示す。本観測では相対湿度と山頂滞在時のオゾンデータが欠測となっている。神奈川県自然環境保全センターから登山口の区間（A）、登山口から尾根線までの区間（B）、尾根線と山頂の間の区間（C）、尾根線から登山口までの区間（D）、登山口から神奈川県自然環境保全センターまでの区間（E）に分類した。区間 A、E は、自動車で移動中であるが、助手席の窓からオゾン計の吸気口を出して車載観測を実施した。区間 B、D ともに 600m 以上の標高差の中を観測しているが、濃度レベルに大きな変動はなかった。区間 B の 10 時 55 分頃（図 3-2 の尾根線付近）でオゾン濃度と温位（Potential Temperature）の大幅な上昇が観測された。区間 D では途中のオゾン濃度の記録が欠損しているが、測器の表示を目視確認した値は山頂と同程度であった。下山時は、尾根線付近においてオゾン濃度の変動は観測されなかったが、温位の急激な減少は観測された。

図 3-4 に 2015 年 6 月 24 日の観測結果を示す。本観測においても 11 時 50 分頃の尾根線通過時にオゾン濃度と温位の急激な増加が観測された。また、2014 年 5 月 30 日の観測では欠測となっていた相対湿度は尾根線通過時に大きく減少していた。下山時には 2014 年 5 月 30 日の観測と同様に、尾根線付近（14:41 ～ 14:56）でオゾン濃度の大きな変化はなかったが、温位は大きく減少、相対湿度は増加していた。2015 年 10 月 21 日の観測においても、登山時に尾根線付近でオゾン濃度の上昇、温位の上昇、相対湿度の減少が観測され、下山時には尾根線付近で温位の減少が観測された（図示なし）。なお、この日は曇りで霧も時々観測され、霧発生時には湿度の増加とオゾン濃度の減少が観測された。



図 3-2 2014 年 5 月 30 日檜洞丸移動観測登坂時の経路とオゾン濃度分布

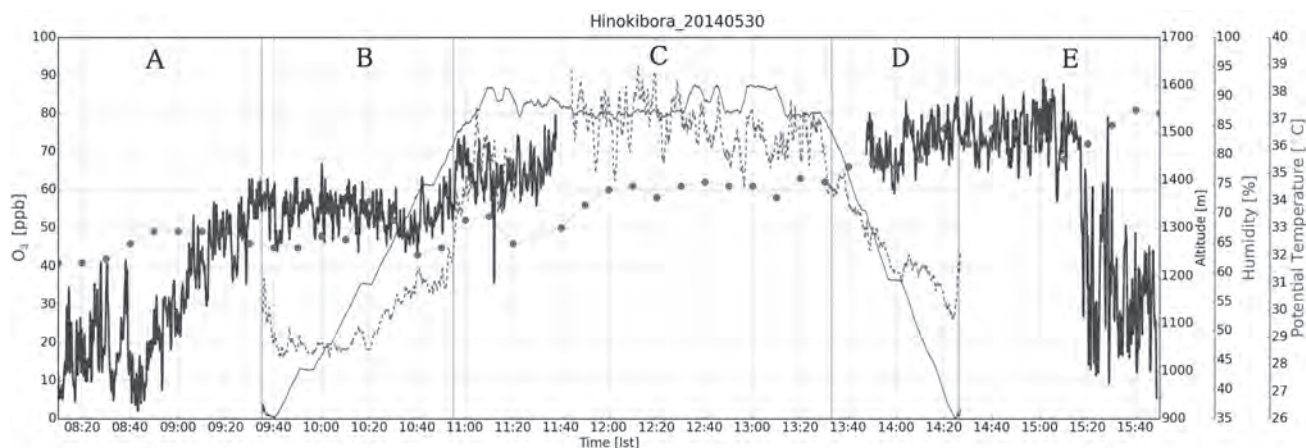


図 3-3 2014 年 5 月 30 日檜洞丸移動観測結果 (太実線:2B202 オゾン、破線:温位、丸:檜洞丸オゾン 10 分値、細実線:標高)

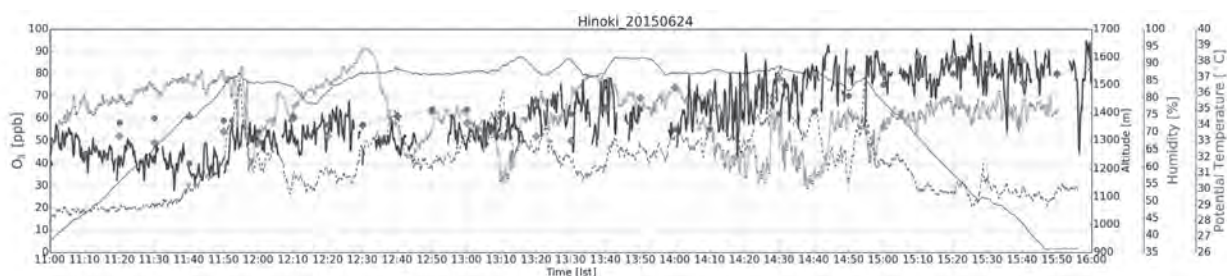


図 3-4 2015 年 6 月 24 日檜洞丸移動観測結果 (太実線:2B202 オゾン、破線:温位、点線:相対湿度、菱形:丹沢山 10 分値、丸:檜洞丸 10 分値、細実線:標高)

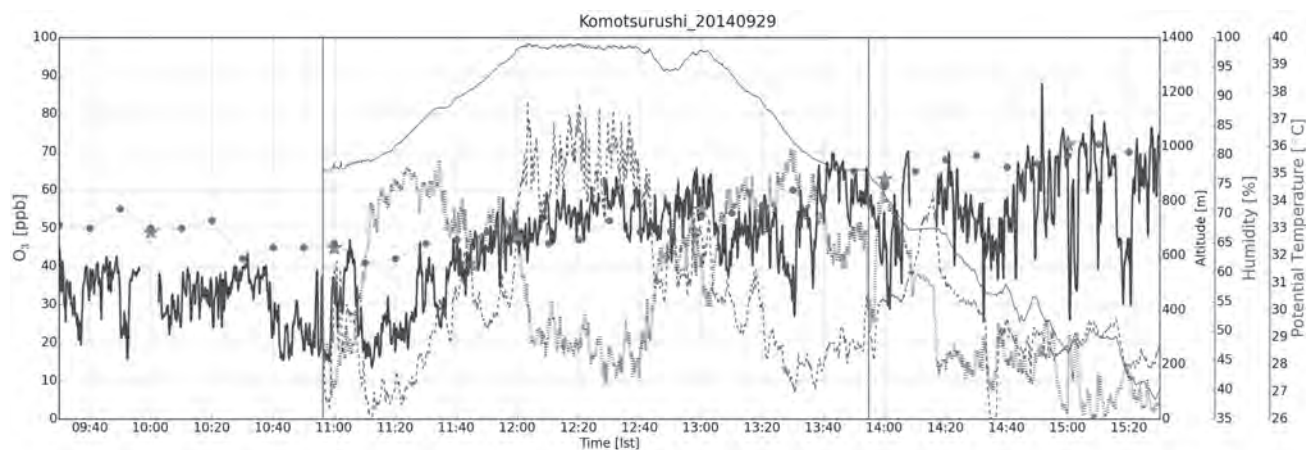


図 3-5 2014 年 9 月 29 日菰釣山移動観測結果 (太実線:2B202 オゾン、破線:温位、点線:相対湿度、丸:檜洞丸 10 分値、星:犬越路オゾン 1 時間値、細実線:標高)

(2) 菰釣山における移動観測結果

図 3-5 に 2014 年 9 月 29 日の観測結果を示す。菰釣山では、山梨県道志村にある登山口から尾根線まで沢沿いを登り、尾根線伝いに西へ山頂を目指す経路で観測した。菰釣山では、檜洞丸におけるようなオゾン濃度急変地点はなかった。この観測では、オゾン濃度増加時に相対湿度が減少し、オゾン濃度減少時に相対湿度が増加する変動が数箇所を確認された。同様の変動は全移動観測を通して複数回確認さ

れているが、オゾン濃度の増減時に必ずしも相対湿度が変動するというわけではない。

(3) 丹沢山地稜線縦走観測

より広い範囲のオゾン濃度分布を把握するために、2014 年 10 月 3 日に丹沢山地を縦走する移動観測を実施した。図 3-6 の登山口から下山口が徒歩による移動観測区間である。塔の岳 - 丹沢山間で濃度変動・濃度レベル共に大きくなった区間を除くと、

オゾン濃度は約 30ppb でほぼ一定であった。檜洞丸南西の尾根線を通過したのは 15 時過ぎであり、オゾン濃度に顕著な変化はなかった。なお、2B202 によるオゾン濃度は、丹沢山、檜洞丸の測定局を通過した時の Dylec1150 による測定値とよく一致していた。



図 3-6 2014 年 10 月 3 日移動観測経路とオゾン濃度分布

IV まとめ

本研究では、丹沢山地のオゾン濃度データの解析、および、小型オゾン計による登山道移動観測を実施した。

これまで山地では平地よりも日変動が小さく、特に夜間のオゾン濃度が高いことが知られていたが、今回の結果からも、その傾向が確認された。丹沢山と檜洞丸では、濃度レベルも変動のタイミングもほぼ同じであり、常に同じ気塊の影響下にあったと考えられる。一方、2014 年夏の菰釣山における観測では、ほとんどの濃度極大は平地で昼間に高濃度が起きた後の夜間に起きており、多くの場合、丹沢山と檜洞丸における極大と同期していた。ただし、幾つかの事例においては、菰釣山の濃度極大が、丹沢山・檜洞丸よりも数時間遅れることがあった。

月ごとの平均値を 2012 年度において比較した結果、丹沢山と檜洞丸では 5 月に最大、8 月に最小となり、高標高の国設酸性雨局における挙動と類似していた。ただし、8 月の他月と比較した相対濃度は、八方尾根、赤城＞檜洞丸、丹沢山、犬越路＞梶原の関係にあり、太平洋上の低オゾン濃度気塊の影響が大きいほど 8 月の濃度が相対的に低くなっていると考えられた。

2012 年度平均の日内変動は、朝に最小、昼過ぎに最大となるパターンは同じであるが、その振幅は

標高が高いほど小さくなっていた。特に朝の最小値が起きるデータ時刻は、神奈川県一般局平均が 6-7 時であるのに対し、犬越路は 7-8 時、丹沢山・檜洞丸は 9-10 時と大きな差があった。一方、昼過ぎの最大は、神奈川県一般局平均が 14-15 時、犬越路が 15 時、丹沢山・檜洞丸が 15-16 時と比較的差は小さかった。濃度レベルはどの時刻においても、丹沢山・檜洞丸＞犬越路＞神奈川県一般局平均 となっており、標高による濃度差は日中に小さく、夜間に大きくなっていた。

樹木へのオゾン暴露量を 4-9 月の AOT40 で評価した結果、国設酸性雨局や犬越路において 2000 年台半ばから AOT40 が経年的に減少する傾向にあることがわかった。丹沢山・檜洞丸における近年の AOT40 を他局トレンドに合わせて過去へ外挿すると、2008 年ころには 80ppmh 程度の比較的高い値であったことが推定された。

風向別のオゾン濃度を評価した結果、夏季を除くと明瞭な風向依存性はなかった。夏季は、丹沢山・檜洞丸においては、北風時に高濃度、南風時に低濃度であったが、犬越路において、北風時に低濃度、南風時に高濃度であった。丹沢山・檜洞丸は、昼間に高濃度となった関東平野内陸部の気塊の夕方以降の陸風による移流、一方、犬越路は、昼間に高濃度となった丹沢山地の南から南東側の平野部の気塊の夕方までの海風による移流が強く影響していると考えられる。

詳細な空間分布を把握するために、日中に登山道を通る移動観測を行った。その結果、檜洞丸山頂の南西に位置する尾根線を横切る際に、午前中（西から東に移動）はオゾン濃度が急増するが、午後（東から西へ移動）は変化しないことがわかった。なお、午前、午後ともに、気温（温位）は西側で低く東側で高く、相対湿度は西側で高く東側で低くなっていた。気温と相対湿度の差は地形と日射の関係で決まっているが、オゾン濃度は平地からの移流の進行によって午前と午後の差が生じたと考えられる。

なお、オゾン濃度は気温と正相関、相対湿度と逆相関することが多く、山岳地形内での気塊の挙動を理解するヒントとなると思われる。

同様の移動観測は、松山市淡路ヶ峠（標高 273m）などでも実施されており、多くの地点でオゾン濃度の急変が観測されている（Kanda, 2015）。

V 引用文献

- 相原敬次 (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・内山佳美・山根正伸・越地 正・相原敬次 (2007) III 丹沢山地のブナ着葉期におけるオゾン濃度分布. 丹沢大山総合調査学術報告書 P396-399
- Burley, J.D. and Bytnerowicz, A. (2011) Surface ozone in the White Mountains of California. *Atmos. Environ.* 45: 4591-4602
- Burley, J.D., Bytnerowicz, A., Ray, J.D., Schilling, S. and Allen, E.B. (2014) Surface ozone in Joshua Tree National Park. *Atmos. Environ.* 87: 95-107
- Burley, J.D. and Ray, J.D. (2007) Surface ozone in Yosemite National Park. *Atmos. Environ.* 41: 6048-6062
- Bytnerowicz, A., Musselman, R. and Szaro, R. (2004) Effects of air pollution on the Central and Eastern European mountain forests. *Environ. Pollut.* 130: 1-3
- Bytnerowicz, A., Omasa, K. and Paoletti, E. (2007) Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environ. Pollut.* 147: 438-445
- 畠山史郎 (2003) 酸性雨ー誰が森林をいためているのか?. 209pp, 日本評論社, 東京
- 井川 学・大河内 博 (2009) 丹沢大山における大気化学観測と酸性沈着が森林生態系に及ぼす影響. エアロゾル研究 24: 97-104
- 平岡環境科学研究所 (2007) 丹沢大山総合調査学術報告書
- 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: A65-A77
- 神奈川県環境部 (1997) 丹沢大山自然環境総合調査報告書
- 神奈川県自然環境保全センター (2012) 神奈川県自然環境保全センター報告
- Kanda, I. (2015) Measurement of Ozone Concentration on the Elevation Gradient of a Low Hill by a Semiconductor-Based Portable Monitor. *Atmosphere* 6: 928-941
- Karnosky, D.F., Skelly, J.M., Percy, K.E. and Chappelka, A.H. (2007) Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests. *Environ. Pollut.* 147: 489-506
- 河野吉久 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (I) 欧米における樹木衰退の現状と研究の動向. 大気環境学会誌 39: A1-A8
- 河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳美 (2007) II 丹沢山地周辺のおゾン濃度の実態とブナに対する影響. 丹沢大山総合学術報告書 P383-395
- 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報告 (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
- 松隈大亮・板橋秀一・鶴野伊津志・若松伸司 (2012) 丹沢山地における高濃度オゾンの広域移流現象の数値解析. 大気環境学会誌 47: 173-178
- Matyssek, R. and Innes, J.L. (1999) Ozone - A risk factor for trees and forests in Europe? *Water Air Soil Pollut.* 116: 199-226
- 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
- Paoletti, E. (2006) Impact of ozone on Mediterranean forests: A review. *Environ. Pollut.* 144: 463-474
- 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定. 大気環境学会誌 48: 251-259
- 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 (2012) 数値モデルを用いた丹沢山地のオゾンの挙動解析. 大気環境学会誌 47: 217-230
- 酸性雨研究センター (2005) 増え続ける対流圏オゾンの脅威

- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2006) Atmospheric Chemistry and Physics. 1225pp, John Wiley & Sons, New Jersey
- Shigihara, A., Matsumoto, K., Sakurai, N. and Igawa, M. (2008) Growth and physiological responses of beech seedlings to long-term exposure of acid fog. Sci. Total Environ. 391: 124-131
- Shigihara, A., Matsumura, Y., Kashiwagi, M., Matsumoto, K. and Igawa, M. (2009) Effects of acid fog and ozone on the growth and physiological functions of *Fagus crenata* saplings. J. For. Res. 14: 394-399
- 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 J. Atmos. Environ. 2: 81-89

