

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

武田麻由子*・小松宏昭*

Development of a comprehensive monitoring method for assessing the vegetation decline in the beech forests

Mayuko TAKEDA* and Hiroaki KOMATSU*

I はじめに

ブナ林は、わが国の冷温帯を代表する森林であり、北海道南部から九州まで広範囲に分布している。自然性の高い極相林として存続している森林も多く、また生物多様性豊かな地域として保全されている地域も多い。しかし、最近、丹沢(越地ら, 1996)、英彦山(猪上ら, 2002)をはじめとして、全国各地でブナ林の衰退が報告されている。

衰退の原因としては、オゾンなどの大気汚染物質や酸性霧の関与、ブナハバチなどの虫害、台風等の風害、温暖化や少雪化、林床植生の退行なども含めた土壤乾燥化、さらにはシカの食害等が指摘されている(山根ら, 2007)。これらのブナ林の衰退状況や原因については地域によって様々であり、衰退状況や影響因子等を個人差が生じないよう客観的に把握する必要があるが、このための健全(衰退)度評価、樹木活性、植生状況、温湿度や土壌水分量などといった樹木の実態や生育環境について、全国規模での統一的な手法に基づく基礎調査や原因究明はほとんど行われていない。

そこで本研究では、ブナ林域を対象に、全国規模での実態調査への展開が可能となるような、簡易かつ効率的な総合植生モニタリング手法を開発することを目的とし、ブナ林を有する都道府県等が参画する総合植生モニタリングのネットワークの構築、ブナ林生態系の衰退度に関する総合調査マニュアル(案)の作成を行った。さらに、総合調査マニュアル

(案)の実効性や課題点を検証するため、各地域の環境研究所等の参加のもと、試行的な調査を実施した。

なお、本研究は平成19～21年度地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究において実施したものであり、本報告は共同研究成果報告書及び平成22年度版神奈川県環境科学センター研究報告第33号掲載の報告に丹沢山における調査結果を加えて再構成したものである。

II 総合植生モニタリングのネットワークの構築

先述のように、各地のブナ林の衰退状況や原因については地域によって様々であるため、ブナ林の衰退原因の解明のためには相互の情報交換が重要である。そこで、相当面積のブナ林を有し、ブナ林についての調査研究を行っている北海道から福岡県までの10道県の地方公共団体環境研究機関、自然研究機関の計12機関と、国立環境研究所からなる総合植生モニタリングのネットワークを構築した。総合植生モニタリングネットワーク参加機関を表1に示す。

次いで、参加機関はその実情に合わせて、総合調査マニュアル(案)に基づく統一調査およびブナ林に係る各道県独自の調査のいずれか、あるいは双方の調査を行った。

*神奈川県環境科学センター調査研究部(〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮1-3-39)

表1 総合植生モニタリングネットワーク

	No.	機 関 名
北海道	1	北海道環境科学研究センター
	2	秋田県健康環境センター
東 北	3	秋田県農林水産技術センター 森林技術センター
	4	埼玉県環境科学国際センター
関 東 甲信越	5	神奈川県環境科学センター
	6	神奈川県自然環境保全センター
	7	静岡県環境衛生科学研究所
北 陸 東 海 近 畿	8	富山県農林水産総合技術センター 森林研究所
	9	福井県自然保護センター
中 国 四 国 九 州	10	岡山県自然保護センター
	11	広島県立総合技術研究所 保健環境センター
	12	福岡県保健環境研究所

Ⅲ ブナ林生態系の衰退度に関する 総合調査マニュアル（案）の作成

ブナ衰退度調査としてブナ葉の葉緑素量調査および目視衰退度調査、ブナ生育環境調査として近傍のオゾン濃度調査の3項目を柱とする総合調査マニュアル（案）を作成した。山間地で行う調査であるため、調査方法の細部については、各ブナ林の状況に合わせ、適宜変更可能とした。

【総合調査マニュアル（案）】

1 ブナの選定

ブナ林の全体的な衰退を把握するため、全体の衰退状況を大まかに健全なブナ、衰退が著しいブナおよび中庸のブナの3段階に分け、それぞれの分類群から各3本ずつ、計9本程度選定する。

2 調査時期

3に示すブナ葉の葉緑素含有量（SPAD値）および4の目視衰退度については、ブナの展葉直後（5月末）および落葉直前（10月末）の計2回実施する。5のオゾン濃度については、4月末～5月末および10月末～11月末の各1か月間とする。いずれの調査も可能であれば、4月末～11月末の間、毎月調査を実施する。

3 ブナ葉の葉緑素含有量（SPAD値）

調査木1本につき、太陽光が直接当たる側の枝3本を選定する。次いで各枝から最大、最小の葉を除外した、中程度の大きさの葉をランダムな位置から10枚ずつ、計30枚の葉を選定して葉緑素の調査を行う。葉緑素の調査は、コニカミノルタ社製葉緑素計（SPAD-502）を用いて行う。10枚の平均値を各枝の葉緑素量とし、調査木1本につき選定した枝3本分のデータを報告する。併せて調査木の胸高直径、樹高、葉緑素量測定枝の地上からの高さを測定し、記録する。

ブナの葉が手の届く範囲にある場合は、調査を行った枝にテープ等で印をし、継続して同じ枝で調査を行う。ブナの葉に手が届かない場合は、高枝切ばさみ等で枝を切り落とし、速やかに調査を行う。なお、SPAD値は、葉の単位面積あたりの葉緑素含有量を示し、SPAD値が高いほど葉の葉緑素含有量が多いことを意味する。

4 目視衰退度

土壌・植生モニタリング手引書（環境省，2003）では、目視衰退度は葉の密度が最も高い季節に樹勢、樹形、枝の生長量、梢端の枯損、枝葉の密度、葉の変形度、葉の大きさ、葉色、葉の障害の9項目それぞれについて衰退度0（健全）～衰退度4（枯死）の5段階で評価することとしている。しかし、

9項目それぞれを評価するためには経験を要し、個人差も生じやすく、困難な実情がある。加えて、樹木全体に関する項目（樹勢、樹形）、枝に関する項目（枝の生長量、梢端の枯損、枝葉の密度）および葉に関する項目（葉の変形度、葉の大きさ、葉色、葉の障害）はそれぞれ評価が同調する傾向が認められた。

そこで、本研究のマニュアル（案）では、簡易で個人差が生じにくい客観的な指標として、3の調査を行ったブナについて、樹木全体、枝、葉の3項目をそれぞれ衰退度0（健全）～衰退度4（枯死）の5段階で評価スコアを決めることとし、その結果を基に総合判定を行うこととした。総合判定のための目視衰退度評価基準を表2に示す。

5 オゾン濃度

3、4の調査を行った地点において、拡散型パッシブサンプラーを用いた月平均オゾン濃度調査を実施する。拡散型パッシブサンプラーの構造図を図1に示す。

拡散型パッシブサンプラーは各地点2個設置する。オゾンは葉などに沈着するため、林冠下や谷筋を避け、見晴らしの良い、風が通りやすい地点に設置するのがよい。なお、適した場所がない場合は、付近の地形を特記事項に記載する。また、空試験サンプルとして暴露させないサンプラーを1個密封保管しておく。

約1か月間暴露した後、拡散型パッシブサンプラーから捕集用ろ紙を取り出し、キャップ付きポリ

表2 目視衰退度評価基準

a 樹木全体		
評価	内 容	
0	旺盛な生育状態を示し、被害が全く見られず、自然の樹形を保っている。	
1	いくぶん被害の影響を受けているが、あまり目立たず、自然の樹形に近い。	
2	明らかに異常が認められ、自然樹形の崩壊がかなり進んでいる。	
3	自然樹形が完全に崩壊され、奇形化し、生育状態が劣悪で回復の見込みがない。	
4	枯 死	

b 枝		
評価	内 容	
0	旺盛な生育状態を示し、梢端の枯損が見られない。	
1	枝の生長量が若干少なく、梢端の枯損が多少あるが、目立たない。	
2	枝は短く細く、梢端の枯損がかなり多い。	
3	枝は極端に短く、梢端の枯損がきわめて多い。	
4	枯 死	

c 葉		
評価	内 容	
0	枝と葉の密度のバランスがとれており、葉は大きさ、色、形ともに正常である。	
1	枝と葉の密度のバランスが少しくずれており、葉は大きさ、色、形のいずれかに少し異常がみられる。	
2	葉の密度はやや疎であり、葉は大きさ、色、形のいずれかに異常がみられる。	
3	枯葉が多く著しく疎であり、葉は大きさ、色、形のいずれかに著しい異常がみられる。	
4	枯 死	

d 総合判定		
評価	内 容	
0	健 全	
1	少し生育状態に衰えが見られ、枝葉等に少し異常がみられる。	
2	生育状態はかなり衰え、枝葉等の異常が目立つ。	
3	生育状態は劣悪であり、枝葉等に著しい異常がみられ、回復の見込みがない。	
4	枯 死	

プロピレン製試験管に入れ、超純水を10ml加え、手で十分に振とうして抽出を行う。30分以上放置し（一晩放置可）、抽出液中の硝酸イオンをイオンクロマトグラフで定量する。

オゾン捕集用ろ紙上で生成した硝酸イオン量 (ng) と曝露時間 (min)、平均温度 (°C) から大気中のオゾン濃度 (ppbv) を次の式より求める。

$$O_3 \text{ (ppbv)} = \alpha O_3 \times WO_3 / t$$

$$\alpha O_3 = \frac{46.2 \times 102 \times \left(\frac{293}{273 + T} \right)^{1.83}}{9.94 \times \ln(t) - 6.53}$$

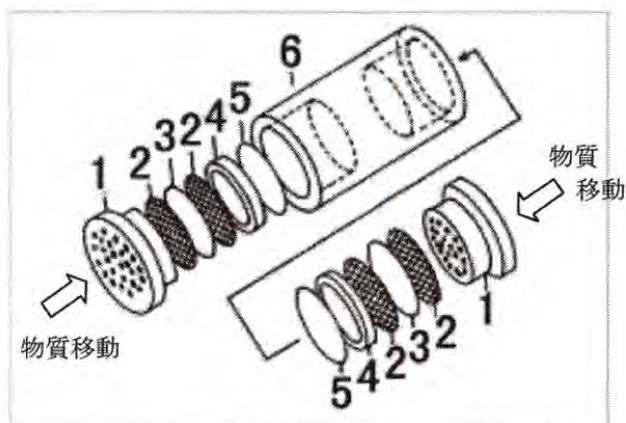
WO₃ : オゾン捕集用ろ紙上で生成した硝酸イオン量から換算した

オゾン量 (ng)

t : 曝露時間 (min)

αO₃ : オゾンの大気濃度換算係数 (ppbv・min/ng)

T : 温度 (°C)



1. ポリエチレン多孔栓（円筒型吸引口 25 個）
2. ステンレス金網（80 メッシュ）
3. 捕集用ろ紙（14.4mmφ）
4. テフロンリング（厚さ 2mm）
5. テフロン円板（厚さ 1.5mm、直径 14.4mm）
6. ジュラコン本体（内径 15mm、外径 19mm、高さ 26mm）

図1 拡散型パッシブサンプラー構造

IV ブナ林生態系の衰退度に関する 総合調査マニュアル（案）に基づく 統一調査の試行結果及び考察

1 調査地点

総合調査マニュアル（案）に基づく統一調査の試行を行うため、2009 年度に北海道（黒松内）、神奈川県（丹沢山）、静岡県（富士山および函南原生林）、岡山県（県立森林公園）、広島県（臥竜山）、富山県（立山）、福井県（平泉寺）、福岡県（英彦山および脊振山）の 8 道県 10 地域で調査した。調査地点を図 2 に示す。

2 ブナ葉の葉緑素含有量（SPAD値）調査 （平成21年度）

図 3 に毎月調査を行った福岡県、静岡県、神奈川県の SPAD 平均値の経月変化を示す。

西日本の福岡県はブナの展葉が早く、盛夏には平均 45 を越える SPAD 値が観測された。東日本である静岡県および神奈川県は、ブナの展葉が西日本に比べて若干遅い傾向がみられ、静岡県のブナは盛夏に SPAD 値が 45 程度まで上昇したが、神奈川県のブナは 40 程度であり、調査期間を通して SPAD 値が低かった。



図2 総合調査マニュアル（案）に基づく統一調査の試行調査地点

● : 全調査実施、○ : オゾン濃度調査のみ実施

また、図4に1回以上の調査を行っている富山県、福井県、岡山県、広島県の結果を重ねて示す。岡山県、広島県、福井県は春に福岡県と同等かそれ以上のSPAD値を示した。広島県は、調査期間を通して高いレベルでSPAD値が推移していた。富山県は、春のSPAD値は神奈川県及び静岡県と同レベルであり、神奈川県及び静岡県と同様、西日本に比べて展葉が遅い可能性が考えられた。

今回の調査結果から、各ブナ林のSPAD値の経月変化の特徴を把握することができた。今回の調査ではフェノロジー(生物季節)を考慮していないため、今後は展葉、落葉の時期を考慮に入れて再解析する必要はあるが、葉緑素計を用いた葉の葉緑素量(SPAD値)調査は簡易かつ調査者による個人差が少ないため、ブナ林生態系の衰退度に関する総合調査マニュアルの調査項目として有効であると思われる。

丹沢山における平成21年度の衰退度別SPAD値の結果を図5に示す。なお、表2の総合判定評価0～1を衰退度小、2を衰退度中、3～4を衰退度大とした。春季、秋季において、衰退度中以上のブナで衰退度小のブナに比べSPAD値が低い傾向が見られたが、有意差はなかった。表2の総合判定評価とSPAD値が著しく異なる個体もあり、今後その理由について詳細に検討する必要がある。

3 目視衰退度調査(平成21年度)

図6に丹沢山(神奈川県)の目視衰退度調査結果を示す。丹沢山の場合、葉は0(健全)～1(軽微な異常)であるが、枝及び樹木全体に異常が見られるブナが多く見受けられた。

図7に各ブナ林の目視衰退度調査の総合判定結果を示す。各県の結果を見ると、最も目視衰退度の総合判定が小さいのは各項目とも0(健全)であった平泉寺(福井県)であった。続いて背振山(福岡県)、立山(富山県)であった。立山は、葉に関する異常はほとんど見られず、総合判定も0(健全)～1(軽微な衰退)であった。臥竜山(広島県)も、葉に関する異常が若干見られ、軽度の昆虫食害があるとしているものの、0(健全)～1(軽微な衰退)であった。富士山および函南原生林(静岡県)は、目視衰退度の総合判定が1(軽微な衰退)～2(衰退が目

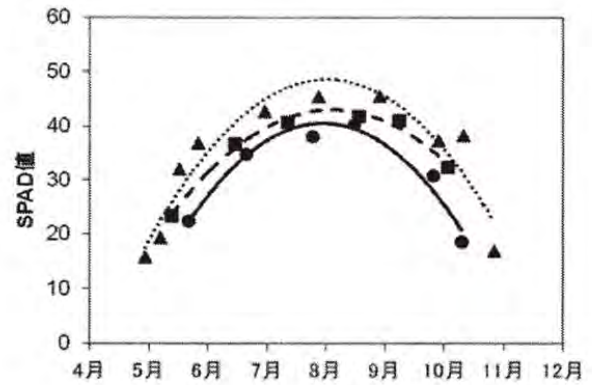


図3 各県のSPAD平均値の経月変化

●：神奈川県、■：静岡県、▲：福岡県

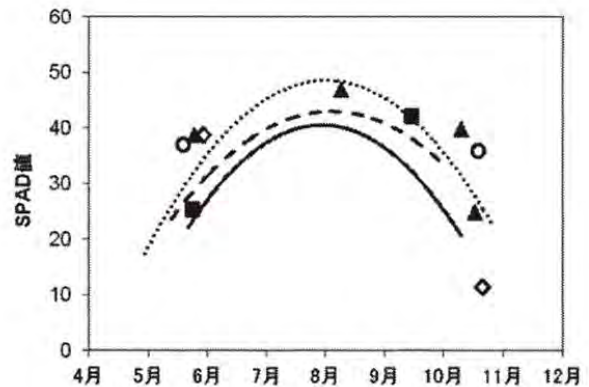


図4 各県のSPAD平均値の経月変化

◇：岡山県、▲：広島県、■：富山県、○：福井県、
実線：神奈川県、破線：静岡県、点線：福岡県

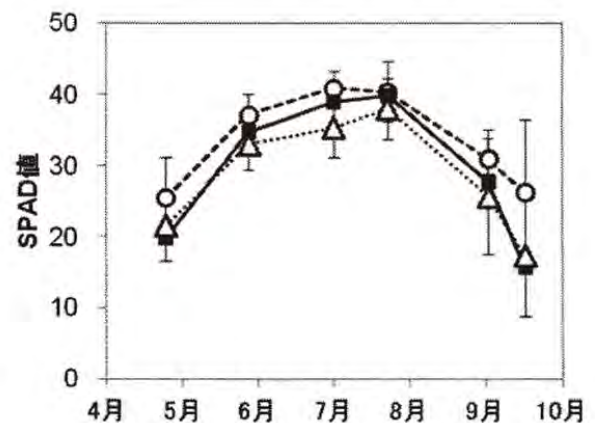


図5 丹沢山のSPAD値の経月変化

○：衰退度小、■：衰退度中、△：衰退度大

立つ)であり、今後の状況を注視する必要があると思われた。英彦山(福岡県)と丹沢(神奈川県)は、最も衰退が進んだ樹木では目視衰退度の総合判定が3(衰退が著しい)を越えるものもあり、早期の原因究明が必要と考えられた。

目視衰退度調査は、ブナ林生態系の衰退度に関する調査項目として必須のものであるが、個人差に影響されやすく、調査自体も困難である。本研究で用いた目視衰退度調査評価基準は、さらなる検討を要するが、簡易であり、衰退状況を客観的に把握することが可能であると思われる。

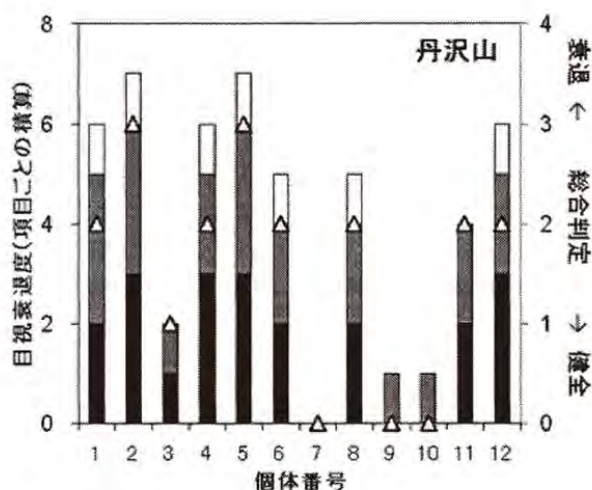


図6 丹沢山(神奈川県)の目視衰退度調査結果

■：樹木全体、■：枝、□：葉、△：総合判定(右軸)

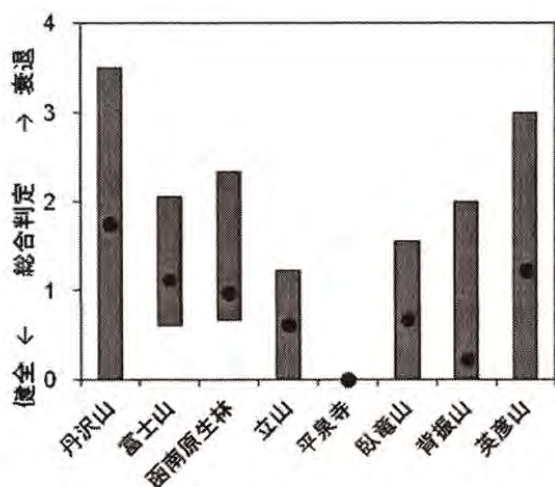


図7 各ブナ林の目視衰退度調査総合判定結果

棒グラフ：最小値～最大値、●：平均値

4 オゾン濃度調査(平成21年度)

図8、9に毎月調査を行った北海道、福岡県(英彦山)、静岡県、神奈川県の月平均オゾン濃度の経月変化を示す。4道県で全く同様の傾向が認められた。すなわち、4～5月の春季に最もオゾン濃度が高く、夏季にはオゾン濃度が低下し、9～10月の秋季に再びオゾン濃度が上昇していた。福岡県(英彦山)および神奈川県が調査期間を通じてオゾン濃度が高く、最もオゾン濃度の低かった北海道と比べ、調査期間を通じて10ppb程度高いことから、オゾンによるストレスを強く受けている可能性が示唆された。なお、ろ紙の不具合により福井県、富山県の落葉直前の調査は欠測であった。

各県とも、静岡県および北海道と同程度の濃度であった。毎月調査を行っている各県の経月変化と比較することにより、展葉直後および落葉直前の2か月間の調査でもオゾン濃度の状況は推測できる。さらに、8月の調査も行くと、オゾン濃度の状況をより正確に把握できると思われる。

図10に平成21年度の丹沢山における月平均オゾン濃度調査結果を示す。春季、秋季は各調査地点でオゾン濃度に差はなかったが、夏季においては丹沢山頂および天王寺尾根で他の地点よりそれぞれ14ppb、7ppb程度高くなっていた。春季および秋季のオゾン濃度は大陸からの移流および成層圏オゾンの沈降の寄与が大きい(大原ら、2007)が、夏季のオゾン濃度は近傍都市域の影響を受けるため、丹沢山頂および天王寺尾根ではより大きく近傍都市域の影響を受けていると思われる。

V おわりに

ブナ林域における全国展開可能で、簡易かつ効率的な総合植生モニタリング手法を開発することを目的に、ブナ林を有する10県12機関が参画する総合植生モニタリングのネットワークを構築するとともに、ブナ林生態系の衰退度に関する総合調査マニュアル(案)を作成した。作成した総合調査マニュアル(案)に基づき統一調査を試行し、目視衰退度および月平均オゾン濃度において福岡県と神奈川県のブナ林で類似性がみられたこと、一方でSPAD値では大きく異なっていることなど、各ブナ林の特徴を

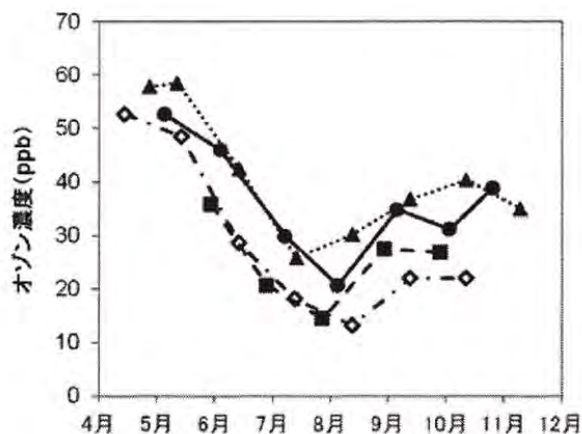


図8 各県の月平均オゾン濃度の経月変化

●：神奈川県、■：静岡県、▲：福岡県、◇：北海道

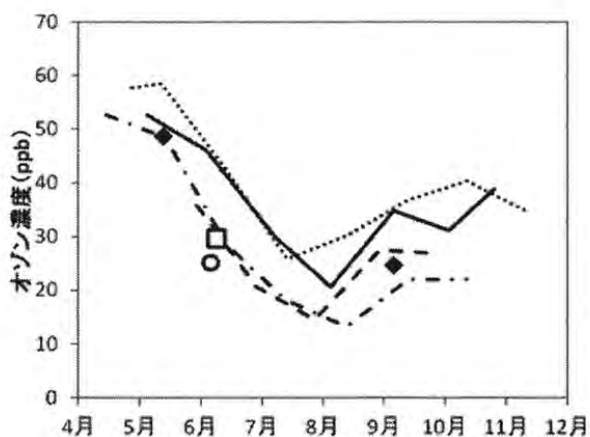


図9 各県の月平均オゾン濃度の経月変化

◆：岡山県、□：富山県、○：福岡県、実線：神奈川県、破線：静岡県、点線：福岡県、一点鎖線：北海道

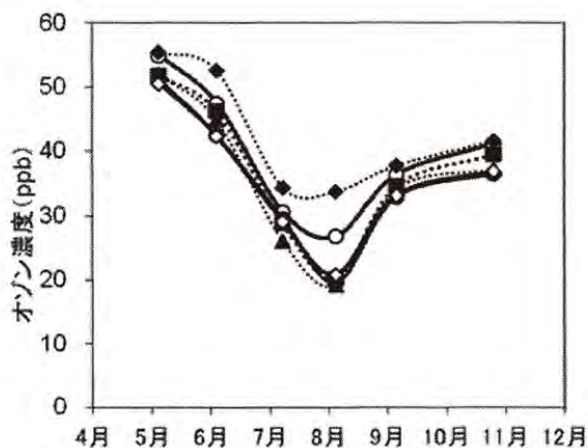


図10 丹沢山の月平均オゾン濃度の経月変化

○：天王寺尾根、◆：丹沢山頂、
■▲：丹沢山木道下、●◇：堂平

把握し、衰退に対する影響因子等を推定できる可能性を示すことができた。本研究で提案した総合調査マニュアル(案)の調査項目は3項目のみであるが、今後新たな調査項目を追加するとともに参加自治体を増やして継続した調査を実施しデータを蓄積すれば、全国のブナ林生態系の衰退度の把握、衰退原因の考察を行う上で重要な情報を提供できると考えられる。

VI 引用文献

- 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No. 55.
- 越地正・鈴木清・須賀一夫 (1996) 丹沢山地における森林衰退の研究(1) ブナ・モミ等の枯損実態. 神奈川県森林研究所報告22: 7-18.
- 環境省 (2003) 土壌・植生モニタリング手引書.
- 大原利真編・光化学オキシダント等に関する共同研究グループ (2007) 日本における光化学オキシダント等の挙動解明に関する研究. 国立環境研究所研究報告. 第193号: 167-174.
- 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) ブナ林の再生に向けた総合解析, 丹沢大山総合調査団(編). (財)平岡環境科学研究所丹沢大山総合調査学術報告書: 703-710.

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

武田麻由子*・小松宏昭*・飯田信行*

Evaluations of ozone-flux by using flux-type passive sampler in Mt. Tanzawa

Mayuko TAKEDA*, Hiroaki KOMATSU* and Nobuyuki IIDA*

I はじめに

オゾンは目や皮膚に刺激を与える等、人体に悪影響を及ぼすと考えられ、オゾンを主成分とする光化学オキシダントの大気中濃度が0.12 ppm以上になると光化学スモッグ注意報が発令される。植物のオゾン感受性は、人間のそれに比べて高いことが知られている。欧米においては、1960年代から樹木に対するオゾン等のガス状大気汚染物質の影響に関する実験的研究が行われており、オゾンは森林生態系に対して最も危険なガス状大気汚染物質と考えられている (Ashmore *et al.*, 1985; Krause *et al.*, 1986; Pye *et al.*, 1988; Chappelka *et al.*, 1998)。

我が国においても、1990年代から森林を構成している樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究が開始され、ブナについても、実生苗に対するオゾンの人工的な曝露実験が数多く行われている (Izuta *et al.*, 1996; Matsumura *et al.*, 1996; Yonekura *et al.*, 2001)。

筆者ら (2001) は、西丹沢犬越路測定局 (山北町中川、標高920 m) において1995年から大気汚染物質等の測定を行い、犬越路におけるオゾン濃度が都市部に比べて著しく高いことを明らかにしてきた。また、同地点においてオープントップチャンバーを用いた野外実験を行い、環境大気をそのまま通気した環境大気チャンバーおよび活性炭フィルターでオゾン等を除去した清浄空気を通気した浄化チャン

バーで2年生ブナ実生苗を3生長期にわたって生育し、生長量等を測定したところ、丹沢山地における現状濃度のオゾンにより葉のクロロフィル含有量 (SPAD値) や個体乾重量が有意に低下することを明らかにした (武田他, 2007)。

一方、丹沢山地におけるオゾン濃度の分布については、阿相ら (2007) が拡散型パッシブサンプラーを用いて主要山頂部を含む丹沢大山地域約100か所のオゾン濃度を測定し、オゾン濃度は主稜線に沿って高く、標高の低い場所や谷筋等の場所では低く、高標高地点に分布するブナは潜在的にオゾンの影響を強く受けていることを明らかにした。また河野ら (2007) は、丹沢山地周辺を対象に風況とオゾンについての輸送解析を実施し、ブナ衰退地点とオゾン濃度分布との間に直接的な関連性は見られないものの、風速の増加に伴ってオゾン濃度も増加する傾向にあり、風速の大きな地点はブナ衰退地点とよく対応しており、風況がブナ衰退に対して重要な要因のひとつであることを示した。

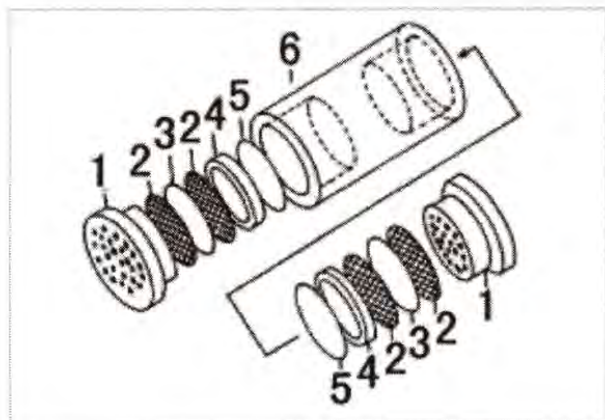
しかし、これらの究明に当たり、電源等のない山間地において、継続的に風速等を測定することは困難である。また、電源を必要としない方法としてガス状大気汚染物質の測定に良く用いられている拡散型パッシブサンプラーがあるが、このサンプラーは風速の影響が排除される構造のため風速とオゾンの累積的な曝露量の関係を検討することができない。そこで本研究では、山間地においてオゾン移流フ

ラックスを推計することを目的に、電源を必要とせず、かつ風速の影響を考慮できる方法として、拡散型パッシブサンプラーを改良したフラックス捕捉型パッシブサンプラーを開発し、この有効性を検討した。

なお、本研究はブナ林衰退機構解明研究プロジェクトチーム（自然環境保全センター、環境科学センター、農業技術センター）による第二期ブナ林衰退機構解明研究の中で実施したものであり、本報告は平成23年度版神奈川県環境科学センター研究報告第34号掲載の報告をオゾン移流フラックスの結果を中心に再構成したものである。

II フラックス捕捉型パッシブサンプラーの作成

図1に拡散型パッシブサンプラーの構造図を示す。本サンプラーは、捕集用ろ紙（図1-3）にガス状大気汚染物質を捕集する仕組みとなっている。捕集に当たり、乱流を防ぎ、風速の影響を極力少なくするために捕集用ろ紙の前面にドラフトシールドとして多孔栓（図1-1）を設けている。本研究では、風速の影響を評価するため、この多孔栓の多孔



1. ポリエチレン多孔栓（円筒型吸引口25個）
2. ステンレス金網（80メッシュ）
3. 捕集用ろ紙（14.4mmφ）
4. テフロンリング（厚さ2mm）
5. テフロン円板（厚さ1.5mm、直径14.4mm）
6. ジュラコン本体（内径15mm、外径19mm、高さ26mm）

図1 拡散型パッシブサンプラー構造図

部分をくりぬいて加工し、フラックス捕捉型パッシブサンプラーとした（図2）。

III オゾン濃度の測定

約1か月間測定地点に設置した拡散型パッシブサンプラーおよびフラックス捕捉型パッシブサンプラーからそれぞれオゾン捕集用ろ紙を取り出し、キャップ付きポリプロピレン製試験管に入れ、超純水を10ml加え、手で十分に振とうした。一晩放置し、オゾンとの反応により生成した硝酸イオンを抽出し、抽出液中の硝酸イオン濃度をイオンクロマトグラフィで定量した。

オゾン捕集用ろ紙上で生成した硝酸イオン量（ng）と曝露時間（min）、平均温度（℃）から大気中のオゾン濃度（ppmv）を次式より求めた。フラックス捕捉型パッシブサンプラーについても同様とした。

$$O_3 \text{ (ppmv)} = \alpha O_3 \times WO_3 / t / 1000$$

$$\alpha O_3 = \frac{46.2 \times 10^2 \times \left(\frac{293}{273 + T} \right)^{1.83}}{9.94 \times \ln(t) - 6.53}$$

WO_3 : オゾン捕集用ろ紙上で生成した
硝酸イオン量から換算した
オゾン量（ng）

t : 曝露時間（min）

αO_3 : オゾンの大気濃度換算係数（ppbv・min/ng）

T : 温度（℃）



図2 フラックス捕捉型パッシブサンプラー（左）と拡散型パッシブサンプラー（右）

IV フラックス捕捉型パッシブサンプラーの評価

2010年4月23日～10月27日の約6か月のブナ生長期間に、丹沢山頂（北緯35°28'27"、東経139°9'46"、標高1,567m）に拡散型パッシブサンプラー及びフラックス捕捉型パッシブサンプラーを設置した。設置場所は周囲に高木のない林冠の開けた場所である。また、同地点には神奈川県自然環境保全センターが設置している大気気象観測所があり、降水量や風向、風速などの気象及びオゾン濃度を継続して測定している。調査日程及び各パッシブサンプラーの測定結果を表1、2に示す。

まず、拡散型パッシブサンプラーを用いたオゾン測定値は、変動係数が2.6～6.3%であり、良好であった。また、同地点に設置しているオゾン濃度計（東京ダイレック社製MODEL1150）の期間平均オゾン濃度と比較すると（図3）、相関係数は0.94と良好であるが、オゾン濃度としては約14%程度過小評

価していることがわかった。なお、落雷等による機器の不具合のためオゾン濃度計の9月以降のデータの信頼性が低かったため、8月末までのデータを使用した。以下の検討についても同様とした。

次に、フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いたオゾン測定値は、拡散型パッシブサンプラーによるオゾン測定値と比較して約2～3倍高く、風速の影響を反映していることがわかった。フラックス補足型パッシブサンプラーは、風速の変動の影響を受けるため拡散型パッシブサンプラーより変動係数が大きく、9.6～15.3%とばらついたものの、オゾン移流フラックスであるオゾン濃度（C）と風速計による風速（V、それぞれ10分値）の積の平均値（C×V）と良い相関を示した（図4）。ここでのy切片

表1 拡散型パッシブサンプラーの測定結果

設 置	回 収	平均値 (ppm)	変動係数 (%)
2010/4/23	2010/5/6	0.051	6.3
2010/5/6	2010/5/28	0.049	2.7
2010/5/28	2010/6/28	0.041	2.6
2010/6/28	2010/7/22	0.032	2.9
2010/7/22	2010/8/30	0.031	6.1
2010/8/30	2010/10/7	0.039	4.4
2010/10/7	2010/10/27	0.036	3.6

表2 フラックス捕捉型パッシブサンプラーの測定結果

設 置	回 収	平均値 (ppm)	変動係数 (%)
2010/4/23	2010/5/6	0.179	9.6
2010/5/6	2010/5/28	0.132	12.7
2010/5/28	2010/6/28	0.111	15.3
2010/6/28	2010/7/22	0.066	14.5
2010/7/22	2010/8/30	0.076	13.0
2010/8/30	2010/10/7	0.093	15.1
2010/10/7	2010/10/27	0.103	11.8

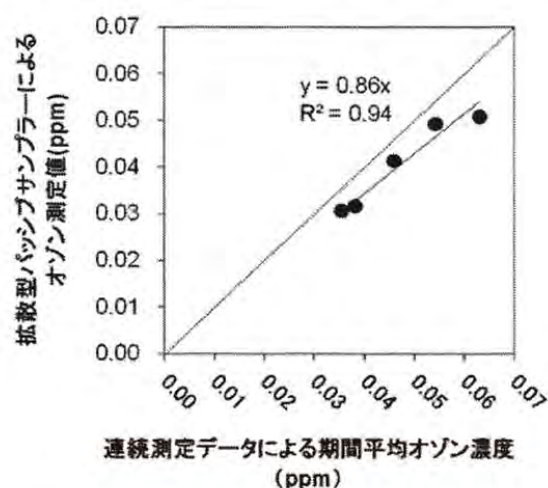


図3 拡散型パッシブサンプラーを用いたオゾン濃度の評価

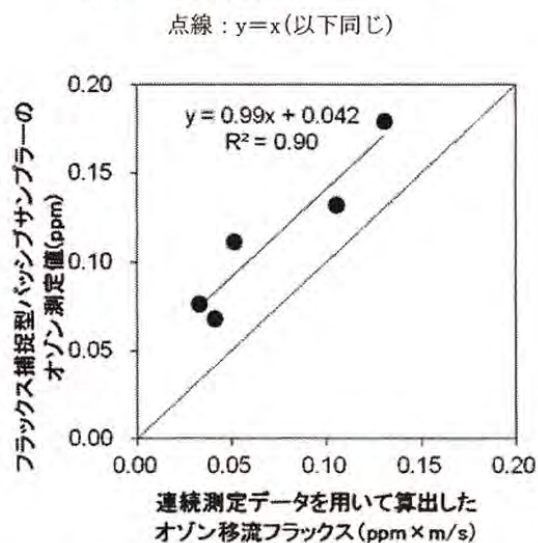


図4 フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いたオゾン移流フラックスの評価

は風速が0 m/sの時のオゾン移流フラックス、すなわちオゾン濃度に相当すると思われるが、この値は拡散型パッシブサンプラーの測定結果(表2)の平均値と同程度となっていた。すなわち、フラックス捕捉型パッシブサンプラーのオゾン測定値は、オゾン濃度に風速による増分を加味した値を示していると考えられた。

また、丹沢山頂における2010年度のオゾン濃度と最大瞬間風速の関係を図5に示す。夏季は風速が大きくなるとオゾン濃度が低くなる逆相関の関係にあったが、春季は風速が大きくてもオゾン濃度が下がらない現象が認められた。また春季には、最大瞬間風速が15m/sを越える強風も観測されたため、春季においては、オゾン濃度が高く、かつ風速が大きい風が植物に対して大きな影響を及ぼすことが想定される。そこで、同様の手法により、フラックス捕捉型パッシブサンプラーのオゾン測定値を用いて、最大オゾン移流フラックスを推定することができるか検討を行った。オゾン濃度(10分値)および最大瞬間風速(V_{max})の積の平均値として算出した最大オゾン移流フラックス($C \times V_{max}$)とフラックス捕捉型パッシブサンプラーのオゾン測定値との関係を図6に示す。フラックス捕捉型パッシブサンプラーは、最大オゾン移流フラックスに対しては、約1/3程度の捕捉率であった。

以上のように、今後データを蓄積して精度の向上

を図る必要性はあるが、フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いることにより、電源等のない山間地において、オゾン濃度に平均風速の影響を加味したオゾン移流フラックスと、植物への影響が特に大きくなることが想定される最大瞬間風速の影響を加味した最大オゾン移流フラックスが推定できる可能性が示唆された。

V フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いた試行調査結果および考察

天王寺尾根(図7中調査地点1)、丹沢山木道下(同2~3)、丹沢山頂(同4)、堂平(同5~6)において、拡散型パッシブサンプラーおよびフラックス捕捉型パッシブサンプラーをそれぞれ2個ずつ、計4個設置した。調査日程は表1および2と同様である。

IVで行った検討を元に、拡散型パッシブサンプラーを用いて推定した期間平均オゾン濃度を図8に、フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いて推定したオゾン移流フラックスの結果を図9に示す。

期間平均オゾン濃度は、丹沢山頂で最も高く、次いで天王寺尾根で高い傾向が認められたが、大きな差はなかった。丹沢山木道下2地点と堂平2地点ではそれぞれ、期間平均オゾン濃度にほとんど差は認

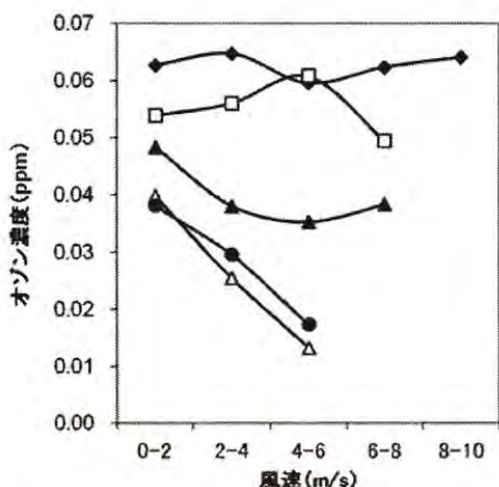


図5 丹沢山頂におけるオゾン濃度と最大瞬間風速の関係

◆: 4月、□: 5月、▲: 6月、●: 7月、△: 8月

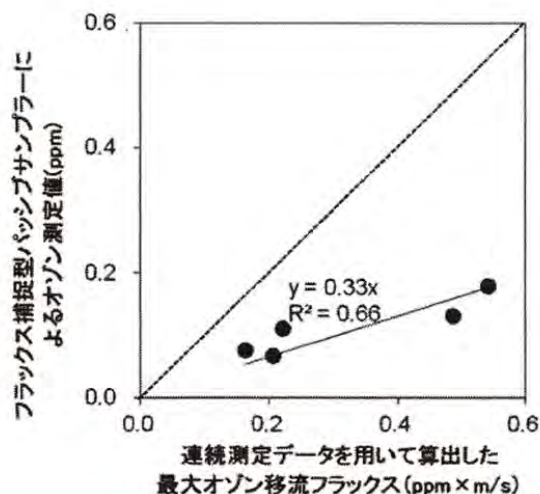


図6 フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いた最大オゾン移流フラックスの評価

められなかった。

一方、オゾン移流フラックスでは、堂平2（調査地点6）で特に夏季において高く、期間平均オゾン濃度とは異なる分布を示すことが明らかになった。すなわち、オゾン移流フラックスは地域差をより顕著に反映することから、期間平均オゾン濃度よりも植物への影響評価により適していることが示唆された。

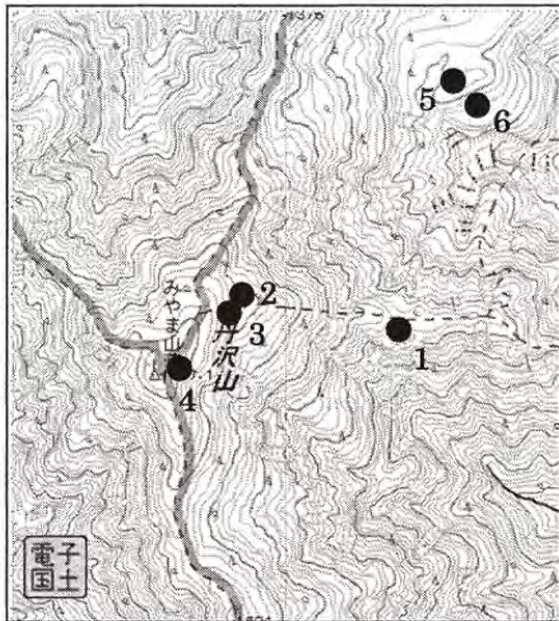


図7 調査地点概要

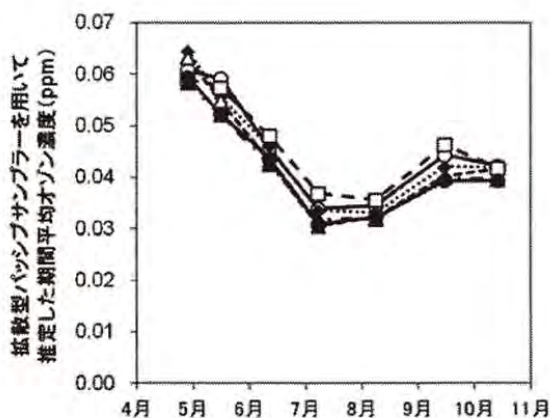


図8 拡散型パッシブサンプラーを用いて推定した各調査地点の期間平均オゾン濃度

○：天王寺尾根、◆：丹沢山木道下1、△：丹沢山木道下2、□：丹沢山頂、▲：堂平1、●：堂平2

これらの結果より、2010年度4～10月の丹沢山のオゾン濃度及びオゾン移流フラックスの状況をより明らかに示すことができた。すなわち、オゾン濃度が低かった地点のうち、丹沢山木道下の2地点は風速も小さかったためにオゾン移流フラックスは小さかったが、堂平2については風速が大きかったためにオゾン移流フラックスは大きくなった。一方、天王寺尾根および丹沢山頂ではオゾン濃度そのものも高く、風速が中程度以上であったことからオゾン移流フラックスが大きくなった。また、時期によりオゾン移流フラックスの大きい地点が異なることも示唆された。図10に夏季（8月）のオゾン移流フラックスの概況を、図11に春季（4～5月）の最大オゾン移流フラックスの概況を示す。夏季のオゾン移流フラックスは堂平2で、春季の最大オゾン移流フラックスは天王寺尾根でそれぞれ大きかった。

VI おわりに

オゾンは森林生態系に対して最も危険なガス状大気汚染物質と考えられており (Ashmore *et al.*, 1985; Krause *et al.*, 1986; Pye *et al.*, 1988; Chappelka *et al.*, 1998)、丹沢のブナに対しても大きなストレスとなっていることが明らかとなっている (武田他, 2007)。一方で、山間地におけるオゾンのブナへの影響を考える上で、風速も重要な要素となっている

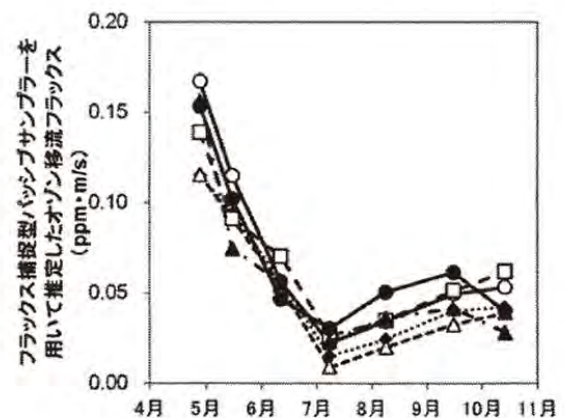


図9 フラックス捕捉型パッシブサンプラーを用いて推定した各調査地点のオゾン移流フラックス

○：天王寺尾根、◆：丹沢山木道下1、△：丹沢山木道下2、□：丹沢山頂、▲：堂平1、●：堂平2

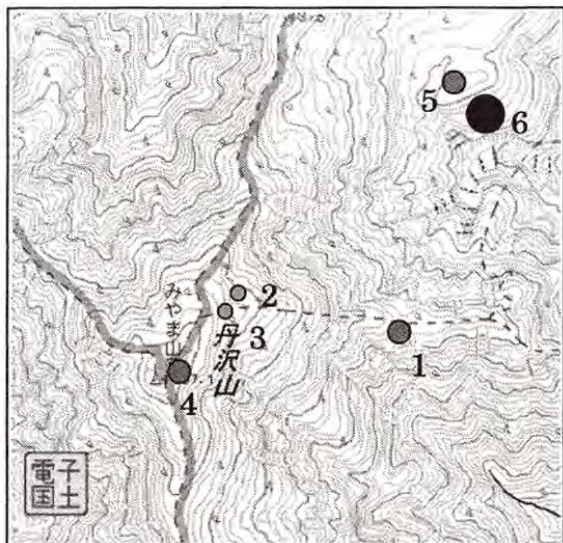


図10 調査地点の夏季(8月)のオゾン移流フラックスの概況

● : <0.03、● : 0.03~0.04、
● : 0.04~0.05、● : >0.05 (ppm・m/s)

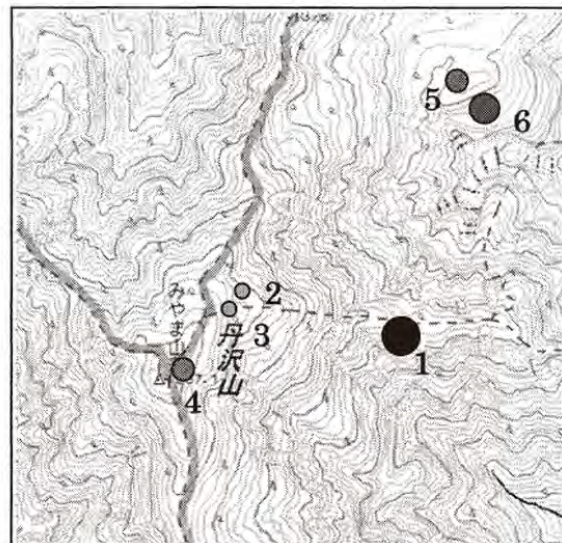


図11 調査地点の春季(4-5月)の最大オゾン移流フラックスの概況

● : <0.45、● : 0.45~0.50、
● : 0.50~0.55、● : >0.55 (ppm・m/s)

ことが示されており(河野ら, 2007)、山間地における風速およびオゾン濃度と風速の積で示されるオゾン移流フラックスを把握することが重要であると考えられた。今回の研究より、既存の拡散型パッシブサンプラーとそれを加工して作成したフラックス捕捉型パッシブサンプラーを並行して設置することにより、電源等のない山間地において、前者により期間平均オゾン濃度を、後者によりオゾン移流フラックスをそれぞれ推定できることを明らかにした。

また、春季においては特に植物に対し大きな影響を及ぼすと考えられる、オゾン濃度と最大瞬間風速の積で示される最大オゾン移流フラックスについても、今後データを蓄積することにより、推定できる可能性が示唆された。今回は6地点における試行調査を実施したが、今後阿相ら(2007)が実施したような丹沢山地全山調査等を実施することにより、丹沢山地全域におけるオゾンおよび風速の状況を明らかにすることができ、丹沢におけるブナ衰退にかかるオゾン及び風速の影響を明らかにし、ブナ林再生への重要な情報を提供できると考えられる。

VII 参考文献

- Ashmore M., Bell N., Rutter J. (1985) The role of Ozone In Forest Damage In West Germany. *AMBIO* 14(2) : 81-87.
- 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 : 396-399.
- 阿相敏明・武田麻由子・相原敬次(2001) 西丹沢における酸性雨及び大気汚染物質の汚染状況. 神奈川県環境科学センター研究報告24 : 82-89.
- Chappelka A. H. and Samuelson L.J. (1998) Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United State : a review. *New Phytol* 139 : 91-108.
- Izuta T., Umemoto M., Horie K., Aoki M., and Totsuka T. (1996) Effects of ambient level of ozone on growth, gas exchange rates and chlorophyll contents of *Fagus crenata* seedlings. *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.* 31 : 95-105.
- 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 : 383-395.

- Krause G. H. M., Arndt U., Brandt C. J., Bucher J., Kenk G., Matzner E. (1986) Forest decline in Europe : Development and Possible Causes. Water, Air, and Soil Pollution 31 : 647-668
- Matsumura H., Kohno Y. (1996) Effects of Ozone and/or Sulfur Dioxide on Tree Species. Proceedings of CRIEPI International Seminar on Transport and Effects of Acidic Substances 190-205pp 1996 CRIEPI, TOKYO, JAPAN.
- Pye M. (1988) Impact of Ozone on the Growth and Yield of Trees : A Review. J. Environ. Qual. 17 (3) : 347-360.
- 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(2) : 107-117.
- 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. 大気環境学会誌36(6) : 333-351.

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

相原敬次*・越地 正*・谷脇 徹*・山根正伸*・

武田麻由子**・田淵尚一***・清水英幸****

Relationships between transpiration and environmental factors in a Japanese beech (*Fagus crenata*) in the Tanzawa Mountains revealed by a sapflow-measurement system

Keiji AIHARA*, Masashi KOSHIJI*, Tooru TANIWAKI*, Masanobu YAMANE*,
Mayuko TAKEDA**, Shoichi TABUCHI*** and Hideyuki SHIMIZU****

要 旨

相原敬次・越地 正・谷脇 徹・山根正伸・武田麻由子・田淵尚一・清水英幸：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 神奈川県自環保セ報告9:61-72, 2012

丹沢山地に生育するブナの衰退に関わる水分ストレスと環境の関係を検討する目的で、ブナ衰退地である檜洞丸および対照地点とした平塚におけるブナ着葉期の樹液流と環境要因を計測し、両者の関係を検討した結果、以下が明らかになった。樹液流速は夜間に遅く、昼間に速いという蒸散と連動した周期性が認められ、ブナ着葉期の蒸散の日周期を反映することを確認した。檜洞丸における夜間の樹液流速は平塚に比較して速く、とりわけ衰退木では、昼間の1割を越える過剰な蒸散量が夜間に算出され、水収支の不均衡による水分ストレスが生じているものと考えられた。檜洞丸のブナでは夜間の樹液流速が高くなる場合は、蒸散がより促進される環境になっていることから、気孔調節機能の低下が考えられ、この要因として以前から影響が懸念されてきている丹沢山地に特異的な光化学オゾンとの関わりが示唆された。

I はじめに

神奈川県の丹沢山地におけるブナ林の衰退要因として、大気汚染(オゾン)、水分ストレスおよび虫害(ブナハバチ)が指摘されている(山根ら, 2007)。しかし、これらの要因がどのように関与してブナを衰退させ枯死にまで至らせるかという生理的な機構については未だ明らかにされていない。

ブナ林の衰退機構の解明にはサイトスケールにおける水分ストレスや林分環境の樹木生理的な知見が必要であり(山根ら, 2009)、とりわけ個体レベルでの蒸散機能と環境との関係を明らかにすることは現在も進行しつつある枯死の防止対策上から急務の課題である。

ブナの枯死への過程をみると、前年の秋に形成された冬芽が翌年になっても展葉しないか、展葉して

* 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)

** 神奈川県環境科学センター (〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮 1-3-39)

*** (株)ウイジン (〒158-0097 東京都世田谷区用賀 2-12-14)

**** 国立環境研究所 (〒305-8505 茨城県つくば市小野川 16-2)

も葉が萎凋し枯れていく状況がしばしば観察される。これは、種々の環境要因によって個体の正常な生育に見合わない水分吸収の低下や過剰な蒸散、すなわち水分ストレス状態が不可逆的に進行し、ブナを衰退から枯死に至らせているものと考えられる。

植物（樹木）の蒸散は、種々の栄養塩類とともに根系から吸収された水分が樹幹を経て葉に到達し主に気孔から蒸発する生理機能で、気温、湿度、日射、大気飽差などの環境要因によって時々刻々変化する。蒸散の定量的な計測方法には、目的や対象個体によっていくつかの方法が知られている。例えば、草本類や個葉レベルあるいはポット植え等の個体では同化箱法や重量法などが用いられる（松尾ら、2009；藤沼ら、1988）。また個体レベルでは植物体内の樹液の移動流を蒸散とみなして計測する樹液流法がある（桜谷、1988；熊谷、2007）。蒸発を含む森林など地域レベルの蒸発散の計測には微気象学的方法がある（小松、2007）。

ブナの衰退や枯死のメカニズム解明の観点から個体レベルの蒸散計測が必要となる。樹液流は蒸散と全く等しい訳では無いが、高い相関を持つことがわかっている（熊谷、2007）。そこで、今回筆者らはブナの衰退が顕著な丹沢山地において、単木レベルでの蒸散に伴う水分ストレスと環境の関係を明らかにする目的から、樹液流法によって時系列的な蒸散状況を把握するとともに、同時に計測した環境要因との関係について検討を加えた。

Ⅱ 方 法

1 計測地点、個体および期間

図1に示す丹沢山地の檜洞丸（標高1601m）の山頂直下南面のブナの衰退が顕著な地点（檜洞丸）と対照地点として神奈川県平塚市（標高20m）の県環境科学センター圃場内（平塚）を選定し、それぞれ異なる年度に計測機器を移設、計測した。

計測個体は平塚および檜洞丸とも、それぞれ3個体実施したが、平塚においては計測機器のトラブルにより1個体のみの計測となった。計測個体は表1に示すように、平塚は樹齢が7年でDBHが8cmである。また檜洞丸は樹齢（推定）が120年から200年で、DBHはNo.1が35.5cm、No.2が45.9cmおよびNo.

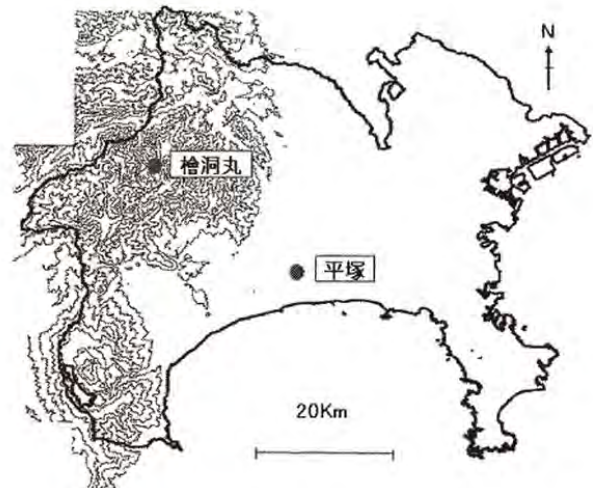


図1 計測地点

表1 計測個体の状況

計測個体	樹齢 (年)	DBH (cm)	辺材面積 (cm ²)	目視による 衰退状況
平 塚	6～8	8	48	なし
檜洞丸No.1	120 (推定)	35.5	659	なし
檜洞丸No.2	140 (推定)	45.9	1014	なし
檜洞丸No.3	200 (推定)	67.5	1840	進行

3が67.5cmである。辺材面積については、各個体、2方向からの生長錐コア試料を採取し水分状況を判別して算出した。目視観察による衰退状況は、写真1に示すように檜洞丸のNo.3の個体が他の2個体に比較して進行している状況が認められた。

計測は、ブナ着葉期で、かつ電源等のトラブルのない期間を選定した。すなわち、平塚が2007年6月1日（午前0時）から8月8日（午後11時）の69日間（1656時間）および檜洞丸が2009年6月11日（午前0時）から8月31日（午後11時）までの82日間（1968時間）を計測期間とした。

2 樹液流の計測方法

樹液流法による蒸散計測には、ヒートパルス法、茎熱収支法などがあり、樹木の個体レベルの蒸散状況を検討する方法として用いられている（上田ら、1994）。今回は、ヒートパルス法の改良型であるGranier（グラニエ）法（Granier, 1987；飯田ら、2003；藤山ら、2005；熊谷、2007）を用いた。グラニエ法は樹木辺材部に上下15cmの間隔をあけて埋め込ん



写真1 計測個体の外観

だヒーターセンサーとリファレンスセンサー間の温度差 (ΔT) から樹液流速を算出する方法で、ヒーターセンサーに与える熱が微量であるため、消費電力も少なく長期間の測定による樹木への影響を低く抑えることができるのが特長である。蒸散に伴って樹液流速が速くなる昼間の時間帯の場合は ΔT が小さく、樹液流速が小さくなる夜間の場合は ΔT が大きくなる。計測値は5分単位でデータロガーにサンプリングし、時間平均の ΔT を樹液流速の算出に用いた。樹液流速をゼロとみなす ΔT の最大値 ($\Delta T_{\max}$) は一日 (午前0時から午後11時まで) の最大値を用い、算出は(1)式 (藤山ら2005) に従った。樹液流センサーはクリマテック (株) 製の CUP-SPF-M型を用い、センサー深度は20mmで計測した。

立石ら (2008) は DBH が 40 cm のブナの樹液流速

度は辺材深度が 2 cm までが最大で深度につれて減少し 14 cm の深さまで存在しているとしており、ブナ樹幹内の水の動態はスギ、ヒノキ等の樹木とは異にしていることも考えられる。今回の樹液流計測ではブナ辺材部における樹液流速を代表値と見なし、日蒸散量 (l/day) を (2) 式により算出した。写真2に檜洞丸におけるブナ衰退と計測状況を示す。

$$\text{樹液流速 (cm/h)} = 1.19 \times K^{1.231} \times 10^{-2} \times 60 \times 60 \quad \dots (1)$$

$$K = (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T$$

日蒸散量 (l/day)

$$= u \text{ (cm/h)} \times \text{辺材部面積 (cm}^2\text{)} \times h \times 10^{-3} \quad \dots (2)$$

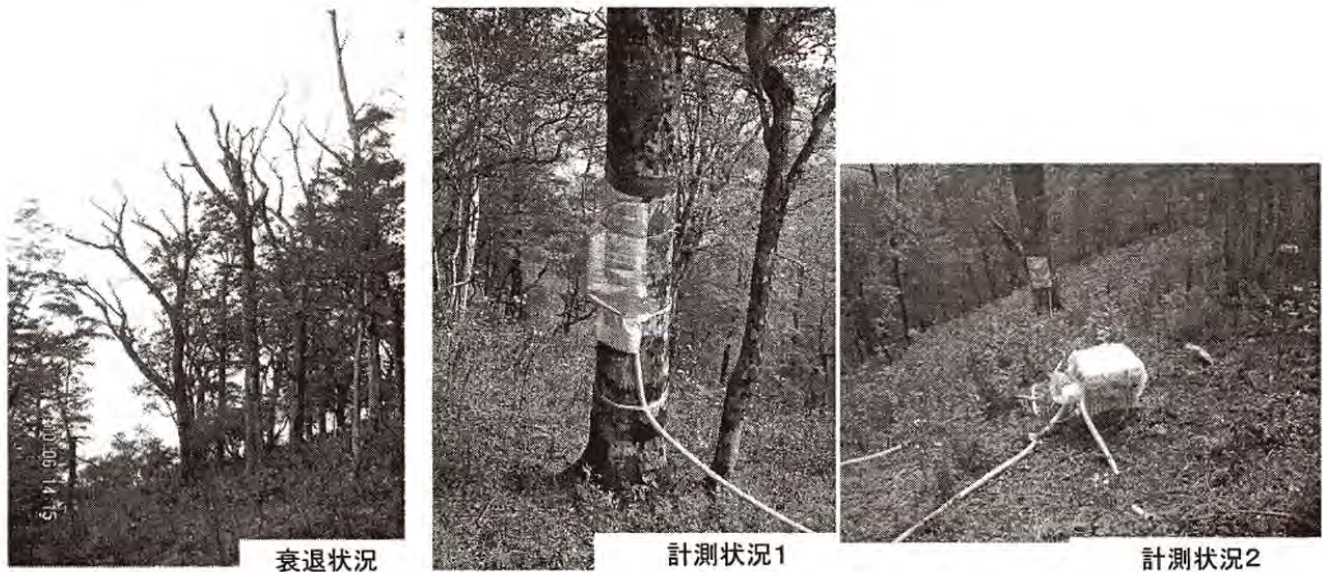


写真2 檜洞丸におけるブナ衰退と計測状況

u : 樹液流速の平均値 (全日、昼間、夜間)

h : 時間 (全日は24時間、昼間は15時間、
夜間は9時間)

3 環境要因の計測

計測する環境要因は気温、湿度、風向、風速および全天日射量とした。また気温および湿度の値から大気飽差を算出した。さらにブナの生育に影響があるとされる大気汚染物質として、光化学オゾン濃度(オゾン濃度)についても併せて計測し、いずれも時間平均値として用いた。なお、檜洞丸の気温および湿度については檜洞丸から北西方向に約2km離れた県大気汚染測定局犬越路(標高900m)の計測結果を用いた。

III 結 果

1 樹液流速の計測結果と蒸散量

計測期間内の樹液流速の計測結果は図2に示すように、連続的に上昇と下降を繰り返す変化を示した。時刻別の平均値としての樹液流速は図3に示すように、夜間は低く推移し、午前6時(06:00)頃から上昇し始め、日中の正午前後に極大値となった。その後は徐々に低下し、午後8時(20:00)以降は早朝まで再び低く推移する日変動を示した。檜洞丸における3個体間の時間値を散布図として図4

に示す。3個体間の樹液流速は単相関関係も強く、時系列的に同期して推移していることが確認された。

樹液流速の集計結果を表2に示す。なお昼間および夜間の時間帯は、全天日射量の計測結果を基準にして、昼間を午前5時から午後7時の15時間に、夜間を午後8時から翌日の午前4時までの9時間とした。樹液流速の最大値はいずれの個体とも昼間に計測されており、平塚が17.2 cm/h、檜洞丸ではNo.1が26.8 cm/hと最も高く、次いでNo.2の22.6 cm/h、No.3の16.0 cm/hと順に低くなった。樹液流速の夜間の最大値は平塚が2.2 cm/h、檜洞丸のNo.1が6.1 cm/h、No.2の5.6 cm/h、No.3の3.7 cm/hと夜間の檜洞丸では最大で6 cm/hを越える樹液流が存在することがわかった。また昼間に対する夜間の比(夜間/昼間)を比較しても、檜洞丸のブナでは平塚に比較して夜間に樹液がより多く流動している状況が認められ、とりわけNo.3の個体では顕著であることがわかった。

ブナ単木単位の推定蒸散量を表3に示す。その結果、全日の蒸散量は平塚で4.7 l/day、檜洞丸が58.9~84.5 l/dayとなった。檜洞丸では一日あたり夜間に4.2~9.2 lの水分が蒸散しており、夜間/昼間でみても檜洞丸のブナは平塚に比較して夜間の蒸散量が多いことが推定できた。

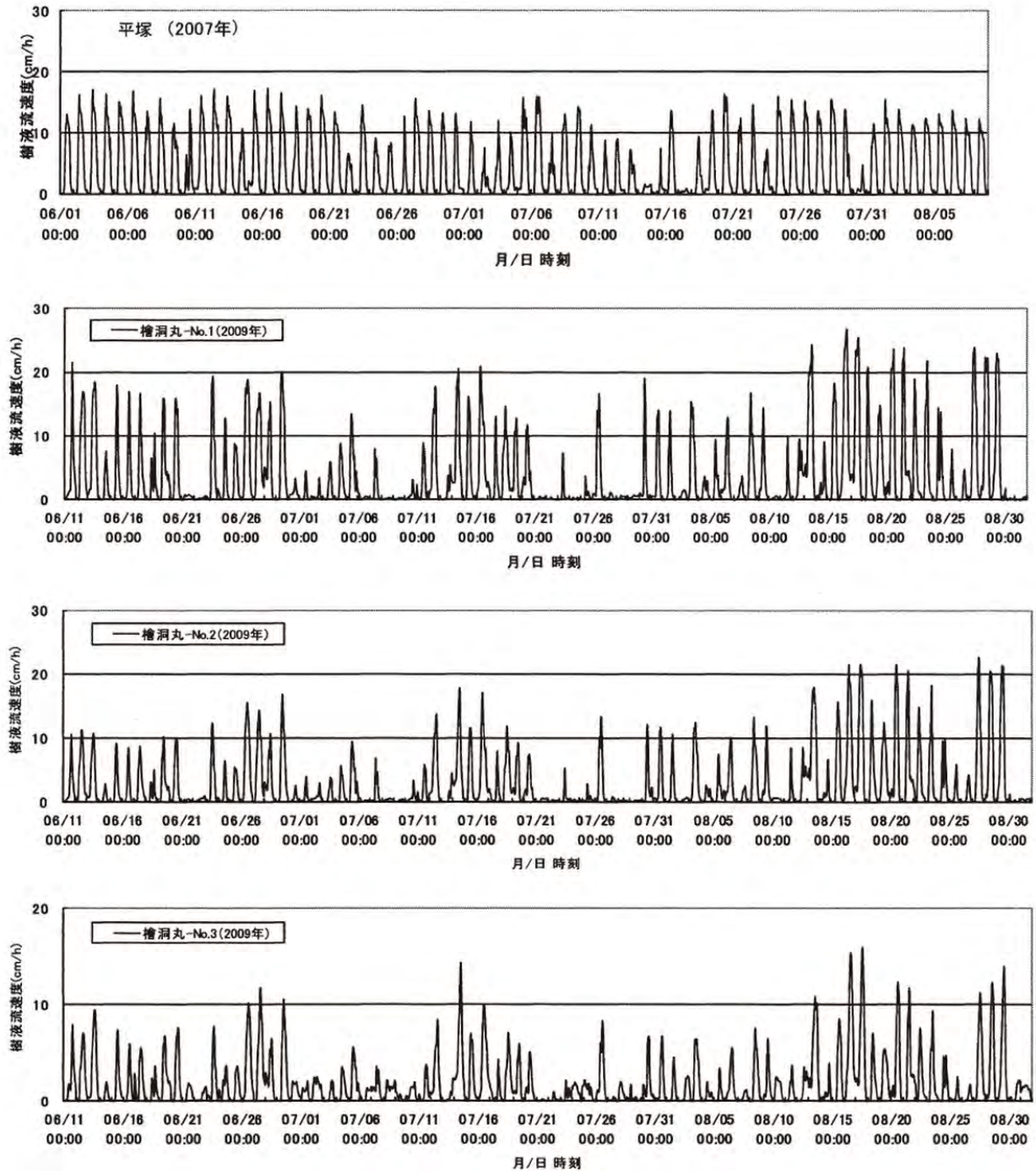


図2 樹液流速の計測結果

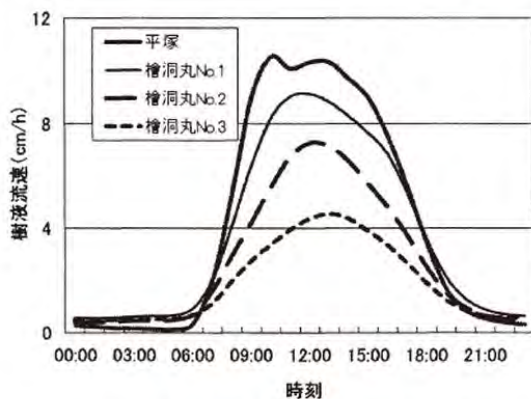


図3 樹液流速の時刻別の平均値

2 環境要因の計測結果

平塚および檜洞丸における環境要因の時刻平均値を図5に、また風向は風配図として図6に示す。檜洞丸は平塚に比較して全般に気温が低く、湿度が高く、大気飽差が低く、風速が高く、全天日射量が低い傾向を示した。またオゾン濃度は、時刻により高いか、同程度であった。経時的な変化は、気温、湿度、大気飽差および全天日射量については両地点ともほぼ同様な推移をするものの、風速、風向および

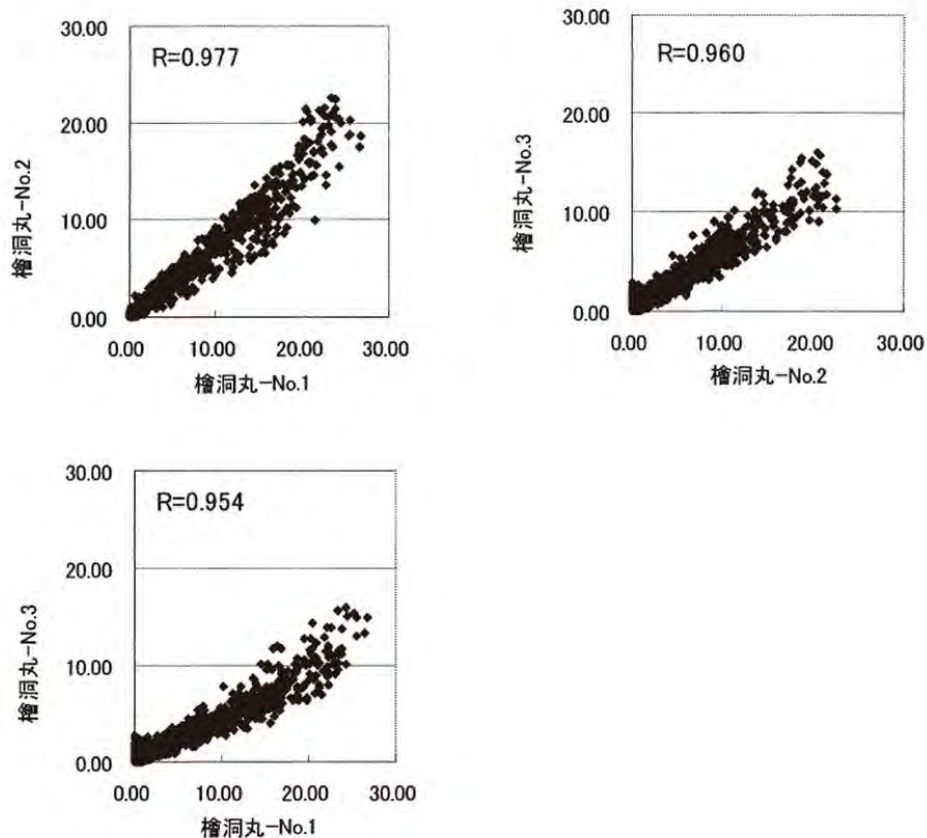


図4 檜洞丸における固体間の樹液流速の散布図と単相関係数(R)

表2 樹液流速の集計結果

単位 (cm/h)										
計測個体	全 日 (午前0時～午後11時)			昼 間 (午前5時～午後7時)			夜 間 (午後8時～午前4時)			平均値の比 (夜間 / 昼間)
	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	
平 塚	17.2	4.1	0.0	17.2	6.4	0.0	2.2	0.3	0.00	0.05
檜洞丸No.1	26.8	3.7	0.0	26.8	5.5	0.0	6.1	0.7	0.00	0.13
檜洞丸No.2	22.6	2.8	0.0	22.6	4.1	0.0	5.6	0.5	0.00	0.13
檜洞丸No.3	16.0	1.9	0.0	16.0	2.7	0.0	3.7	0.6	0.00	0.20

表3 ブナの推定蒸散量

計測個体	蒸散量 (l/day)			
	全 日 (24時間)	昼 間 (15時間)	夜 間 (9時間)	夜 間 / 昼間
平 塚	4.7	4.6	0.1	0.03
檜洞丸No.1	58.9	54.7	4.2	0.08
檜洞丸No.2	67.2	62.4	4.8	0.08
檜洞丸No.3	84.5	75.3	9.2	0.12

オゾン濃度については両地点で違いが認められた。すなわち風速が檜洞丸は平塚に比較して全日を通じて高く、無風時の割合も26.2%と、平塚の47.5%に対して少なかった。主風向は平塚が北東方向と南西方向であるのに対して、檜洞丸では北西方向と南東方向であった。オゾン濃度は平塚が昼間の午後に高くなる山型の濃度推移を示すのに対して、檜洞丸では午後から高くなりそのまま夜間も継続した。

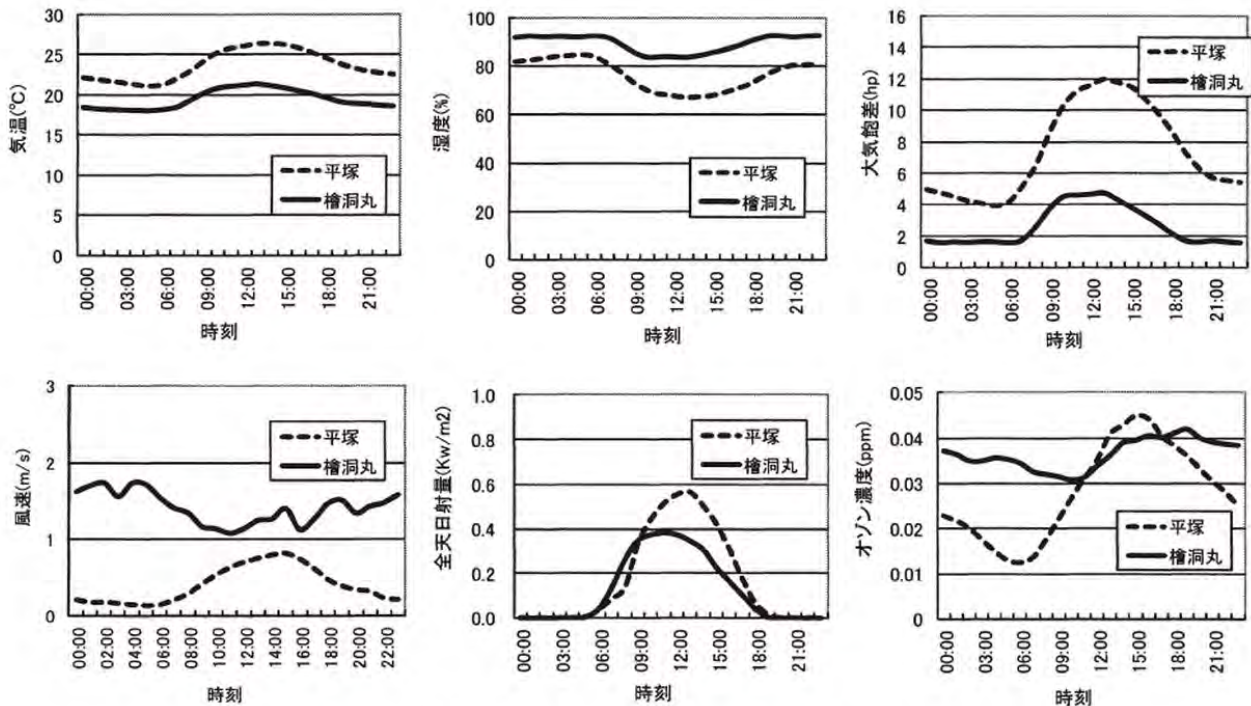


図5 平塚および檜洞丸における環境要因の時刻平均

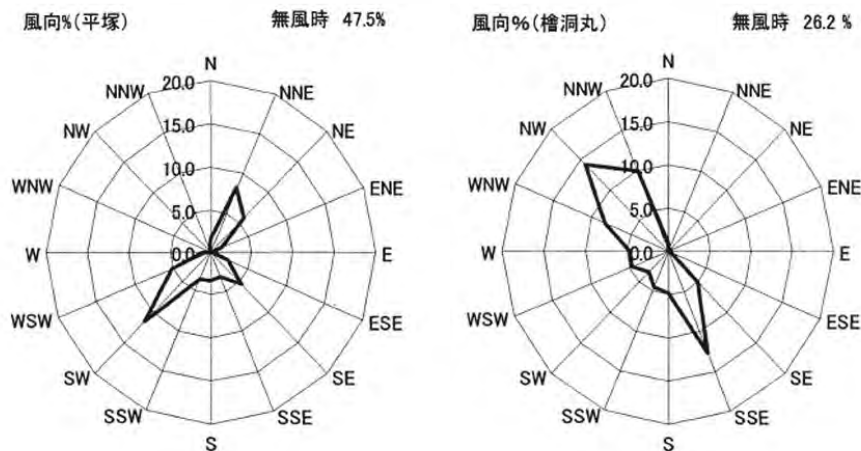


図6 平塚および檜洞丸における風配図

3 樹液流速が速い場合と遅い場合の環境要因の比較

樹液流速が速い場合、すなわち蒸散量が多くなるときの環境要因について検討するため、昼夜別、個体別に時間毎の樹液流速を基準にして、速い場合と遅い場合の環境要因を比較した。なお、樹液流速は時刻による変動が大きいため、昼は午前11時から午後1時までの3時間、夜は午後11時から午前1時までの3時間の計測結果を用いた。平塚は69日間の207時間、檜洞丸は82日間の246時間のうち、

樹液流速の速い、遅い順に平塚が42時間ずつ、また檜洞丸が50時間ずつの環境要因について比較した。樹液流速の速い場合と遅い場合の環境要因の比較結果について、昼の場合を表4に、夜の場合を表5に示す。また、風向については図7に風配図として示す。

昼の樹液流速が速い場合には遅い場合に比較して、両地点とも気温、大気飽差、全天日射量およびオゾン濃度については高く、湿度は低くなったが、風速については平塚で大きく、檜洞丸では小さかつ

表4 昼の樹液流速の速い場合と遅い場合の環境要因の比較※

時間数	樹液流速度 (cm/h)	気温 (°C)	湿度 (%)	大気飽差 (hPa)	全天日射量 (kw/m ²)	風速 (m/s)	オゾン濃度 (ppm)
平塚-昼							
42 (遅い)	3.6 ± 0.8	23.2 ± 0.6	84.3 ± 1.9	4.6 ± 0.6	0.15 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.016 ± 0.003
42 (速い)	14.0 ± 0.2 **	26.7 ± 0.7 **	58.1 ± 3.1 **	14.9 ± 1.4 **	0.80 ± 0.04 **	0.9 ± 0.1 **	0.047 ± 0.005 **
檜洞丸-昼 (No.1)							
50 (遅い)	0.3 ± 0.1	19.0 ± 0.5	95.8 ± 1.2	0.9 ± 0.3	0.17 ± 0.03	2.0 ± 0.3	0.027 ± 0.003
50 (速い)	20.2 ± 0.7 **	24.1 ± 0.7 **	66.3 ± 3.3 **	10.5 ± 1.2 **	0.70 ± 0.06 **	0.7 ± 0.2 **	0.046 ± 0.003 **
檜洞丸-昼 (No.2)							
50 (遅い)	0.3 ± 0.0	19.2 ± 0.5	95.5 ± 1.2	1.1 ± 0.3	0.17 ± 0.03	1.9 ± 0.3	0.025 ± 0.003
50 (速い)	17.3 ± 0.9 **	24.9 ± 0.6 **	65.2 ± 2.9 **	11.2 ± 1.1 **	0.66 ± 0.07 **	0.8 ± 0.2 **	0.046 ± 0.004 **
檜洞丸-昼 (No.3)							
50 (遅い)	0.3 ± 0.1	19.6 ± 0.5	93.3 ± 1.7	1.6 ± 0.4	0.16 ± 0.02	1.5 ± 0.3	0.025 ± 0.003
50 (速い)	10.3 ± 0.6 **	24.8 ± 0.6 **	64.1 ± 2.8 **	11.5 ± 1.1 **	0.70 ± 0.06 **	0.8 ± 0.2 **	0.048 ± 0.004 **

※午前11時から午後1時までの昼の樹液流速が速い場合と遅い場合の環境要因を比較し1% (**), 5% (*) で有意に差があることを示す。

値の土は平均値の95%信頼限度を示す。

表5 夜の樹液流速の速い場合と遅い場合の環境要因の比較※

時間数	樹液流速度 (cm/h)	気温 (°C)	湿度 (%)	大気飽差 (hPa)	全天日射量 (kw/m ²)	風速 (m/s)	オゾン濃度 (ppm)
平塚-夜							
42 (遅い)	0.0 ± 0.0	22.5 ± 0.7	83.3 ± 1.8	4.6 ± 0.6	0.00 ± 0.00	0.2 ± 0.1	0.021 ± 0.004
42 (速い)	0.8 ± 0.1 **	22.1 ± 0.8	80.9 ± 2.8	5.3 ± 0.9	0.00 ± 0.00	0.4 ± 0.1	0.023 ± 0.004
檜洞丸-夜 (No.1)							
50 (遅い)	0.0 ± 0.0	18.5 ± 0.6	92.5 ± 1.4	1.6 ± 0.3	0.00 ± 0.00	1.7 ± 0.4	0.036 ± 0.006
50 (速い)	2.2 ± 0.3 **	19.1 ± 0.5	87.0 ± 3.0 **	2.9 ± 0.7 **	0.00 ± 0.00	1.3 ± 0.3	0.046 ± 0.005 *
檜洞丸-夜 (No.2)							
50 (遅い)	0.0 ± 0.0	18.5 ± 0.7	93.4 ± 1.3	1.4 ± 0.3	0.00 ± 0.00	1.6 ± 0.4	0.033 ± 0.005
50 (速い)	1.6 ± 0.3 **	18.6 ± 0.6	86.7 ± 2.8 **	2.9 ± 0.6 **	0.00 ± 0.00	1.5 ± 0.4	0.049 ± 0.005 **
檜洞丸-夜 (No.3)							
50 (遅い)	0.0 ± 0.0	18.5 ± 0.6	93.6 ± 1.3	1.3 ± 0.2	0.00 ± 0.00	1.5 ± 0.4	0.035 ± 0.005
50 (速い)	1.7 ± 0.2 **	18.8 ± 0.6	90.1 ± 3.2 *	2.2 ± 0.7 *	0.00 ± 0.00	2.1 ± 0.4 *	0.039 ± 0.006

※午後11時から午前1時までの夜の樹液流速が速い場合と遅い場合の環境要因を比較し1% (**), 5% (*) で有意に差があることを示す。

値の土は平均値の95%信頼限度を示す。

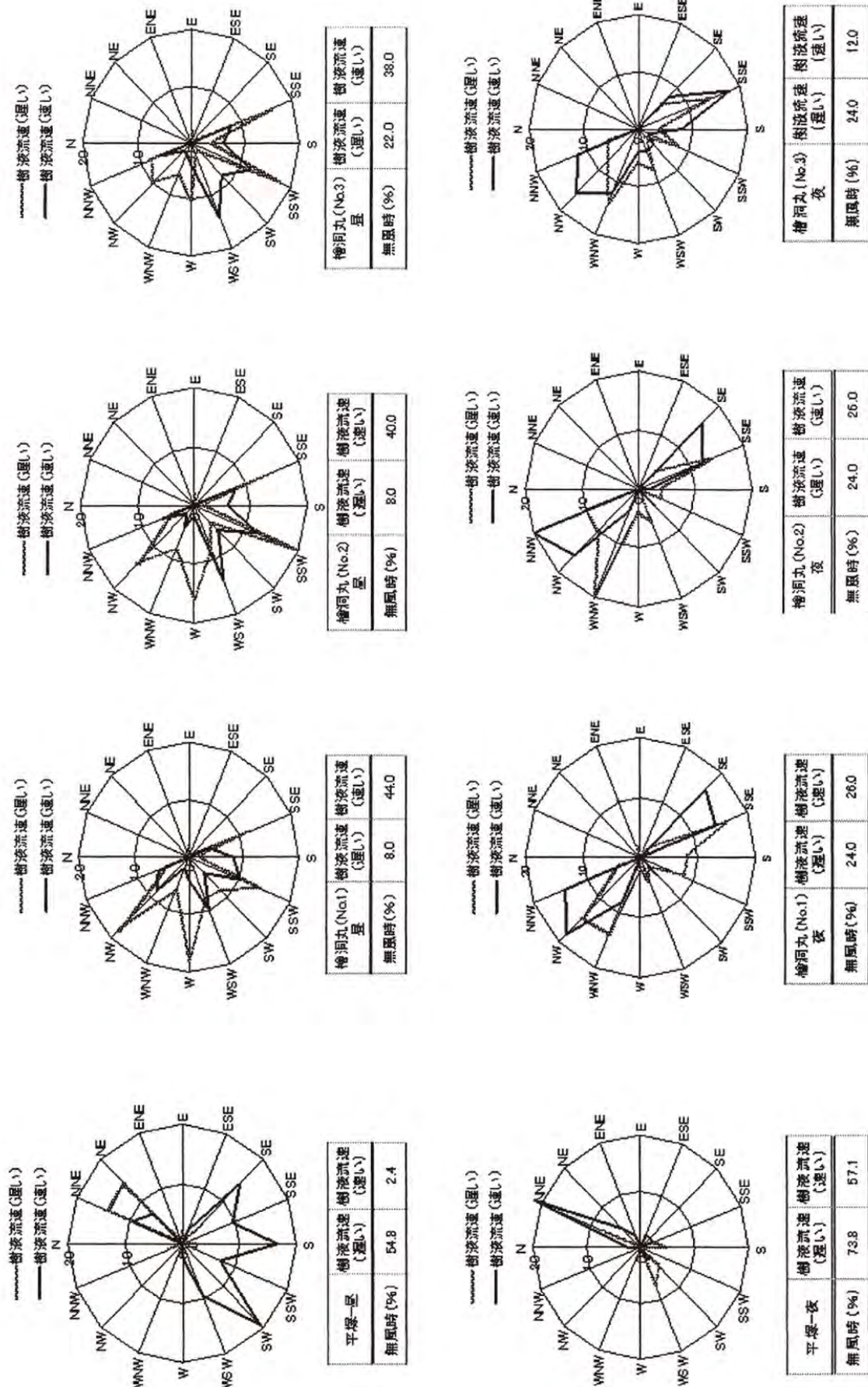


図7 樹液流速の違いによる風配図(風向頻度%)の比較

(昼を午前11時から午後1時までとし、夜は午後11時から午前1時までとした)

た。風向については、平塚は南東から南西系方向の風が多く、檜洞丸では顕著な違いは認められなかった。無風時の割合は樹液流速度が速くなる場合は平塚では少なくなるが、檜洞丸では多くなることがわかった。

夜の樹液流速度が速い場合は、遅い場合に比較して平塚ではいずれの環境要因にも違いが認められないのに対して、檜洞丸では全個体で湿度が低く、大気飽差は高くなった。風速はNo.3の個体で大きくなり、オゾン濃度はNo.1とNo.2の個体で高かった。風向については、平塚は北北東の風が多くなるが、檜洞丸ではほとんど違いはなかった。無風時の割合は樹液流速度が速くなる場合は平塚では若干少なくなり、檜洞丸のNo.1とNo.2の個体では違いがみられないものの、No.3の個体では少なくなった。

IV 考 察

まず、樹液流計測を用いた手法の有効性を検討する。ブナ等広葉樹における樹液流速度の計測事例では、最大値として9 cm/hrから55 cm/hrの値が示されている(籠谷ら, 2009)。これらの値と比較して、今回の樹液流速度の計測結果は、ほぼこの範囲に入っていることが確認できる。グラニエ法を用いた計測方法によってブナの展葉開始時期、落葉期あるいは枝の切断による蒸散の変化の状況を樹液流速度で捉えられることが確認されている(相原ら, 2008)。さらに、夜間に低く、昼間に高くなる樹液流速度の周期性や檜洞丸の3個体間の同期性も確認されていることから、今回の樹液流速度の計測結果は、環境に応じた単木単位でのブナ着葉期の蒸散状況を反映したものと評価できる。

本来、夜間の蒸散は平塚のように極めて少ないと考えられているにもかかわらず、檜洞丸のブナでは昼間の1割を越える過剰な蒸散が試算され、個体毎の水収支の不均衡、すなわち水分ストレスが生じている。戸塚ら(1997)は檜洞丸でのブナ単葉の光合成測定から、衰退木(被害木)では夜間の蒸散速度や気孔コンダクタンスが健康な対照木に比較して高いことを認めており、今回の樹液流速度による計測結果からも同様なことが確認出来る。

樹液流速の変化に伴う蒸散の日周変動の違いには平塚と檜洞丸の環境要因の違いが反映されていると考えられる。すなわち、檜洞丸では、標高差により気温が低く湿度が高くなるため平塚に比較して大気飽差も低く、雲や霧の発生が多いため日射量も少ない傾向にある。また風についても檜洞丸では平塚に比較して、風速の変化が顕著であることが予想される。しかし、檜洞丸のオゾン濃度は、昼間は平塚と同程度であるものの、夜間になっても昼間と同程度か、それ以上の濃度が継続している状況が認められる。丹沢地域では檜洞丸に代表される高標高域における稜線地域の光化学オゾンは、しばしば市街地並の高濃度になり、しかもその濃度が夜間も引き続き継続する状況にあることがすでに確認されている(河野ら, 2007; 阿相ら, 2007)。今回の結果からも依然として丹沢地域の光化学オゾンによる特異的な大気汚染の状況は変わっていないものと考えられる。

一般的に植物の蒸散は、気温、大気飽差および日射の上昇とともに多くなることが知られている。実際、昼に樹液流速度が速い場合には、両地点とも気温、大気飽差および全天日射量とも高くなっている。風向に関しては平塚では南から西系が主風向で、檜洞丸では大きな違いは認められないが、風速は平塚と檜洞丸では逆の傾向がある。このことは風配図の無風時の割合とも一致しており、昼の蒸散は檜洞丸では風速が弱まる時に多くなることが推察されるが、この風速を除く環境要因が昼の蒸散に及ぼす影響は地点による差がないといえる。

一方、夜の樹液流速度が速い場合には、平塚では環境要因に差異は認められないのに対して、檜洞丸では湿度が低く、大気飽差が高い。さらに衰退が進行した個体では風速も高く、蒸散が促進される環境要因になっていることがわかる。このことは檜洞丸の個体では夜間の気孔制御が正常に機能していない状況(気孔調節機能の低下)になっていることが原因のひとつとして考えることができる。この被害木(衰退木)の気孔調節機能の低下について、戸塚ら(1997)はオゾンによる影響ではないかとしており、今回の環境要因の比較結果からもオゾン濃度が高くなっている状況と合致する。

ブナはオゾン曝露によって成長低下や早期落葉な

どの衰退は顕在化するが、硫黄酸化物曝露のような急性的に枯死までは至らないことがこれまでに知られている（伊豆田ら，1997；武田ら，2007）。植物は大気汚染ガスに対しては気孔閉鎖等の生理的防御機能が働いており、とりわけ気孔の開閉機構についても古くから多くの研究がなされている（近藤ら，1984）。例えば、葉面や気孔においては障害が現れる前にスーパーオキシドデスムターゼ（SOD）活性やアスコルビン酸量の低下による防御機能が破壊されることや、伊豆田ら（2006）は葉の生理機能に対するオゾンの影響として、一般的に植物は葉緑体の光合成活性が低下し気孔は閉鎖するが、ブナの場合には高濃度のオゾンに曝露後に光合成活性が低下することに加え気孔閉鎖もみられないとしている。今回、丹沢山地の野外計測結果は、気温、日射に左右されない夜間の場合に檜洞丸の2個体でオゾン濃度が高くなっていることに加え、丹沢山地に特異的な大気汚染状況があることから、ブナの気孔調節機能の低下に光化学オゾンが影響を及ぼしていることが示唆される。

V ま と め

丹沢山地に生育するブナの衰退要因としての水分ストレスと環境との関係を検討する目的で、対照地点とした平塚とブナ衰退地である檜洞丸において、ブナの着葉期の樹液流速度と環境要因の計測を実施し、以下のことが明らかになった。

- ①樹液流速度の計測結果は夜間に低く、昼間に高くなる周期性が認められ、個体間の同期性も確認されたことから、環境に応じた単木単位でのブナ着葉期の蒸散状況を反映していた。
- ②檜洞丸における夜間のブナの樹液流速度は平塚に比較して高く、とりわけ衰退木では、昼間の1割を超える過剰な蒸散量が算出され、個体毎の水収支の不均衡、すなわち「水ストレス」が生じているものと考えられた。
- ③檜洞丸の環境を平塚と比較すると、気温は低く、湿度は高く、大気飽差は低く、風速は高く、日射量は少ない状況で、山地と平地に伴う環境要因の特徴が示されたが、大気汚染物質であるオゾン濃度については、夜間になっても昼間と同程度か、

それ以上の濃度が継続する特異的な状況が認められた。

- ④樹液流速度の速い場合と遅い場合の環境要因を検討した結果、昼の場合は平塚、檜洞丸とも風速を除いて大きな違いは認められなかった。しかし、夜間の場合は平塚と異なり、檜洞丸のブナでは光化学オゾンによる影響と考えられる気孔調節機能の低下によって、蒸散が促進されやすい環境要因になっていることがわかった。

VI 引用文献

- 相原敬次・武田麻由子・越地 正・田淵尚一・清水英幸（2008）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－野外におけるブナ個体の蒸散および樹液流の計測－，平成20年度地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究報告要旨。
- 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．丹沢大山総合学術調査報告書，396-399，神奈川県。
- 藤沼康実・古川昭雄（1988）植物の計測と診断，105-114，朝倉書店，東京。
- 藤山洋介・広瀬茂樹・大槻恭一・小川 滋（2005）Granier法による樹液流測定に基づくヒノキ林における蒸散量の推定－御手洗水試験流域における観測例－，九大演報，86，15-31。
- Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309-320.
- 飯田真一・小林義和・田中 正（2003）Granier法を用いた樹液流速の長期連続測定，水文，水資源学会誌16(1)，13-22。
- 伊豆田猛（2006）植物と環境ストレス，10-23，コロナ社，東京。
- 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。
- 籠谷泰行・服部和佐・中畑里枝子・山尾 敬・福井佑介・宮本洋司・荻野和彦（2009）広葉樹の樹

- 液流速－樹種の違いと季節変化－，第56回日本生態学会，自由集会講演要旨。
- 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，丹沢大山総合学術調査報告書，383-396，神奈川県。
- 小松 光（2007）森林水文学，131-147，森北出版，東京。
- 近藤矩朗（1984）大気汚染ガスに対する植物の防御機能，国立公害研究所研究報告，第64号，75-87。
- 熊谷朝臣（2007）森林水文学，110-130，森北出版，東京。
- 松尾奈緒子・三木直子・廣部 宗（2009）ガスチャンバー法（同化箱法）および重量法による個葉の蒸散特性の評価，低温科学67，137-142。
- 桜谷哲夫（1988）植物の計測と診断，114-118，朝倉書店，東京。
- 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(2)，107-117。
- 立石麻紀子・熊谷朝臣・陶山佳久・日浦 勉（2008）ブナの水利用様式の地理変異，第55回日本生態学会全国大会一般講演要旨p3-039。
- 戸塚 績・青木正敏・伊豆田猛・堀江勝年・志摩克（1997）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要因について，丹沢大山自然環境総合調査報告書，99-102，神奈川県。
- 上田正文・吉川 賢（1994）夏の無降雨期間がフウの樹液流速に与える影響，日林誌76，249-257。
- 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）ブナ林の再生に向けた総合解析，丹沢大山総合学術報告書，03-710，神奈川県。
- 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13，5-13。

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

関 達哉*

Effect of ozone (O₃) gas on the translocation profile
and transpiration of seedlings of *Fagus crenata*

Tatsuya SEKI*

要 旨

関 達哉：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 神奈川県自環保セ報告9:73-79, 2012 ブナ(*Fagus crenata*)の苗木に対し、7月および9月にオゾンガスを人工的に数時間暴露し、その後の同化産物の転流パターンの変化について調べた。7月の6時間1回暴露では、葉、1年枝、旧枝におけるRSA(寄与率)が、オゾン処理区でやや高かったが有意ではなく、逆に細根においてはオゾン処理により低下していた。幹ではオゾン処理により有意にRSAが低下した。太根においては、逆にオゾン処理区が対照区に比べて有意に増加した。9月の7時間1回暴露では、貯蔵器官である太根への転流量を低下させたことが示唆された。また、今回、芽においても対照区より寄与率が低い傾向であった。また、9月にオゾン暴露を1日6時間、間隔を開けて3日間にわたり行ったところ、葉緑素含量の指標であるSPAD値に対する有意な影響が認められ、対照区の89%に低下していた。蒸散速度に対するオゾン暴露の影響は認められなかった。これらのことから、7月および9月におけるブナ苗に対する人工的なオゾン暴露が、各器官への分配パターンの変化を引き起こしたと、9月の複数回にわたるオゾン暴露がSPAD値を低下させたことが明らかとなった。

キーワード：ブナ、オゾンガス、転流、蒸散速度、SPAD

I はじめに

1980年代以降、神奈川県丹沢山地の南斜面においてブナ林の衰退が観察されており、その原因として首都圏から移流するオゾンなどの大気汚染物質と、乾燥ストレスが複合的に作用している可能性が指摘されている(武田ら 2000)。衰退地域においては、春から夏にかけて、100ppbを超えるオゾン(O₃)濃度が観測されている(相原ら, 2004)。

武田・相原(2007)は西丹沢犬越路でブナ苗木に

環境大気と浄化大気を3年間にわたり暴露したところ、環境大気を暴露することでクロロフィルの減少と落葉の早期化が生じ、成長量が約60%低下することを報告した。

これまで、ブナに関しては、葉の生理活性、糖やデンプンの濃度という観点からの研究がある。2年生ブナ苗に対して、オゾン暴露と土壤中への窒素負荷(最大50 kg・ha⁻¹・year⁻¹)を組み合わせ、大気中オゾン濃度の1.5倍および2.0倍のオゾン濃度を2年間暴露した結果、1年間の暴露においては、

*神奈川県農業技術センター果樹花き研究部(〒神奈川県平塚市上吉沢1617)

純光合成速度の低下、炭素同化効率 (carboxylation efficiency)、光合成関連酵素 (ribulose⁻¹, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco)) および葉内可溶性タンパクの低下と葉内の酸性アミノ酸の増加が認められ、葉内タンパクがオゾンにより分解されている可能性が示唆された (Yamaguchi *et al.*, 2007 a)。また2年間の暴露後の個体乾重量に対するオゾンと窒素負荷による交互効果が認められ、窒素負荷が増すことによりオゾンによるブナ苗の個体乾重量の低下の程度が大きくなり、原因として純光合成速度の低下、窒素利用効率の低下が指摘されている (Yamaguchi *et al.*, 2007 b)。また、60ppb オゾンを5月から10月にかけて長期暴露した試験では、9月における葉内の遊離糖やデンプンの濃度低下、早期落葉や翌年の発芽遅延と葉数の減少を認めている (Yonekura *et al.*, 2004)。平成13年度より18年度まで行われた丹沢大山自然環境保全対策推進事業による「丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査」では、9月下旬における2年生ブナ苗へのオゾン暴露により、暴露72時間後の葉を除く各器官への転流の度合いを示すRSA (寄与率) が相対的に低下した。特に地下部への転流の減少が著しかったという知見が得られている。

一般に、オゾンは、葉面に可視被害が現れないような比較的低い濃度 (150ppb以下) であっても、生長を阻害したり (野内ら, 2001)、同化産物の各器官への分配パターンを変化させる (伊豆田ら, 2006)。生長阻害は光合成能力や物質代謝の乱れが原因と考えられている。また、分配パターンの変化が引き起こされた結果、地上部 (茎葉) に比べて地下部 (根) の生長が著しく阻害され、茎葉に対する根の重量比 (root/shoot ratio) は低下する (Cooley and Manning, 1987)。Nouchi *et al.* (1991) は、水耕栽培の水稻を50ppbと100ppbのオゾンに8週間暴露 (発芽後1か月後の幼苗から出穂期まで) したところ、50ppbの暴露では個体乾物重にあまり大きな変化はないが、100ppbでは個体乾物重が大きく低下し、5週間および6週間で50%にまで低下することを認めている。この時、根と茎葉の比率 (root/shoot ratio) は50ppbと100ppbとも8週間の暴露期間中、常に低下している。このことは、葉で生産された光合成産物の根への分配が少なくなり、茎葉への分配

率を高めていることを示している。カバノキやマツの苗に、約100ppbのオゾンを暴露すると、葉肉細胞や篩部細胞が破壊され、葉の糖濃度の増加、葉脈細胞や篩部組織におけるデンプンの蓄積が引き起こされる (Gunthardt-Georg *et al.*, 1993)。また、インゲンマメにおける安定同位体を用いたトレーサー実験からは、オゾンストレス下では葉から同化産物が他の器官へ転流するのが抑制され、特に根への転流量が低下することが確認されている (Okano *et al.*, 1984)。これは、オゾン暴露が葉で生産された光合成産物の各器官への分配に変化を与え、結果として根の生長を阻害するためと考えられている。

ブナについてもオゾン影響により同化産物の分配パターンが変化する可能性がある。実際に関 (2007) は、9月下旬における2年生ブナ苗への6時間の150ppb オゾン暴露により、暴露72時間後の分配パターンが変化し、葉を除く各器官への転流の相対的な低下と地下部への転流の顕著な減少を認めている。しかし、この報告は1時期の1回の試験に基づくものであり、ブナの同化産物の分配パターンを議論するにはデータが不足している。また、ブナ苗木において長期の暴露ではクロロフィルの減少 (武田・相原, 2007) が生じるものの、短時間暴露のクロロフィルや蒸散への影響は明らかとなっていない。

そこで、新たに7月と9月の2時期にオゾン暴露を行い、暴露の有無によるブナの同化産物の転流パターンの違いを調査し、また9月暴露では短期暴露後の蒸散速度と葉緑素含量 (SPAD 値) に及ぼす影響を調査したので報告する。

II 材料と方法

1 オゾンガスが7月におけるブナ苗の転流に及ぼす影響

(1) ブナ苗へのオゾンおよび¹³CO₂の暴露方法

ア 実験施設と供試材料

オゾン暴露実験は、神奈川県平塚市上吉沢にある神奈川県農業技術センターの作物実験棟内に設置した¹³CO₂同化システムチャンパー (60 cm × 60 cm × 100 cm) (以下、チャンパー) に行った。このチャンパーは閉鎖空間 (0.36 m³) において、光強度、温度、相

対湿度、二酸化炭素濃度を一定にした条件下で¹³CO₂同化を行うことができる。実施時期は2009年7月および2008年9月とした。供試ブナ苗は、各年の3月に2年生苗木を12cmポット(苗高約50cm)に植栽し、実験に供試するまで農業技術センター内で通常管理した。

イ 7月の暴露実験

7月暴露では、2009年7月20日午後にチャンバーにブナ苗を入れて照明を点灯し、18:00に消灯した。オゾン暴露日である7月21日は8:00に点灯し、9:00からオゾンを導入し始めて11:00に150ppbに達し、17:00までの6時間暴露を行った。暴露終了後、17:30にブナ苗をチャンバーから出し、¹³CO₂施用まで露地で通常管理を行った。¹³CO₂施用は、7月24日11:00~17:00の間、チャンバー内にブナ苗を置き、¹³CO₂および¹²CO₂を導入し、それぞれ¹³CO₂ 100ppm、¹²CO₂ 300ppmに制御し、ブナ苗に施用した。終了後は、同化産物の移行量測定まで露地で通常管理を行った。オゾン暴露時および¹³CO₂同化時のチャンバー内気象条件は、温度20℃、相対湿度80%、光量子密度 $693.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、反復は各区10個体とした。対照区はオゾンおよび¹³CO₂暴露を行わないブナ個体10個体とした。

ウ 9月の暴露実験

9月暴露では、2008年9月24日13:00にブナ苗をチャンバーに入れて照明を点灯し、18:00に消灯した。オゾン暴露日である9月25日は7:00に点灯し、9:30からオゾンを導入し始めて10:00に150ppbに達した。17:00に暴露を終了した。暴露後は¹³CO₂施用まで露地で通常の管理を行った。¹³CO₂施用は9月29日にチャンバーにブナ苗を置き、11:45から17:45まで、チャンバー内を¹²CO₂ 200ppm、¹³CO₂ 100ppmの条件に設定して¹³CO₂を同化させた。17:45に同化を終了し、チャンバーからブナ苗を取り出し、その後は同化産物の移行量測定まで通常管理を行った。オゾン暴露時および¹³CO₂同化時のチャンバー内気象条件は、温度20℃、相対湿度60%、光量子密度 $472.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、反復は各区10個体とした。また、対照区はオゾンおよび¹³CO₂暴露を行わないブナ個体10個体とした。

(2) 同化産物の各器官への移行量測定

7月暴露では2009年7月27日に各個体を器官別(葉、当年枝、旧枝、幹、太根、細根)、9月暴露では2008年10月1日に器官別(葉、芽、枝、太根、細根)に解体し、温風乾燥機内(80℃)にて1週間乾燥し、乾燥後に粉砕器(C.M.T, T1-100)で粉砕し、粉末試料とした。試料に含まれる¹³C含量を赤外線アナライザー(JASCO EX-130S)で分析した。得られた測定値から、¹³CO₂無施用個体の各器官の¹³C含量を差し引き、 $^{13}\text{C} \cdot \text{atom}\% \cdot \text{excess}$ とし、各部位における施用¹³Cの占める割合すなわち¹³C寄与率(RSA、寄与率(%))= $\text{部位別atom}\% \text{excess} / \text{施用atom}\% \text{excess}$ を求め、各部位への同化産物の移行量を算出し、施用¹³Cの転流・分配量を求めた。

(3) オゾン単木暴露苗の葉緑素含量(SPAD値)および蒸散速度測定

供試材料として、ブナ2年生苗を2010年3月4日に18cmポットに植栽したものをを用いた(苗高約50cm)。9月13日にチャンバーにブナ苗を置き、9月14日(10:15-16:15)、9月17日(10:15-16:15)、9月22日(9:30-15:30)の6h×3回にわたってオゾンガスを暴露した。チャンバー内気象条件は温度25℃、相対湿度80%、光量子密度 $387.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。対照区として、暴露を行わない個体を用いた。暴露後は露地で通常の管理を行った。オゾン暴露前日(9月13日)にブナ苗をチャンバーに入れて照明を点灯し、18:00に消灯した。オゾン暴露日(9月14日)は8:20に点灯し、葉をサンプリングした後、9:30からオゾンを導入し始めて10:15に150ppbに達した。反復は各区10個体とした。

9月27日(3回目のオゾン暴露5日後)に、各処理区に供試した10個体のうち5個体について、それぞれランダムに選んだ10葉の葉緑素計(SPAD-502 KONICA MINOLTA)によりSPAD値を測定した。

9月27日および10月5日に、スーパーポロメーター(LI-1600, LI-COR)を用いて各区10個体のうち5個体についてランダムに選んだ3葉の蒸散速度を測定した。

Ⅲ 結果および考察

1 7月の暴露実験

暴露後のブナ苗を観察したところ、可視害とみられる症状は認められなかった。

器官別の ^{13}C atom% (図1) およびRSA (図2) に及ぼすオゾンの影響は、葉、1年枝、旧枝 (Branch) においてはオゾン処理区がやや高かったが有意ではなく、逆に細根においてはオゾン処理により低下していた。一方、幹ではオゾン処理により有意にRSAが低下していた。太根においては、逆にオゾン処理により有意に増加していた。

このことから、幹におけるRSAのオゾン処理による低下は、ブナ苗のオゾン暴露により72時間後の各器官への分配パターンが変化したことが明らかとなった。

2006年に行った9月の暴露試験においても、地下部の有意な低下も認められた (関, 2007) が、今回

とは異なる部分も認められた。いずれにしても、RSAの絶対値の高い地下部において、転流パターンの変化が認められた。

結論として、7月の150ppb 6時間暴露により、ブナ苗の転流パターンに変化が生じていた。この変化が最終的にブナ苗の長期的な生育に及ぼす影響は不明である。しかし、RSAの絶対値としては地下部が高かったことから、このような転流パターンの変化が積み重なることで、貯蔵器官における貯蔵養分の量などに及ぼす影響が生じることも推測される。

2 9月の暴露実験

暴露後のブナ苗を観察したところ、可視害とみられる症状は認められなかった。

ブナ苗に対するオゾンガスの影響は、寄与率 (RSA) によれば、葉を除く全ての器官において、対照区に比べ低下していた (図3、4)。特に、細根、芽、太根において対照区より低下しており、太根で

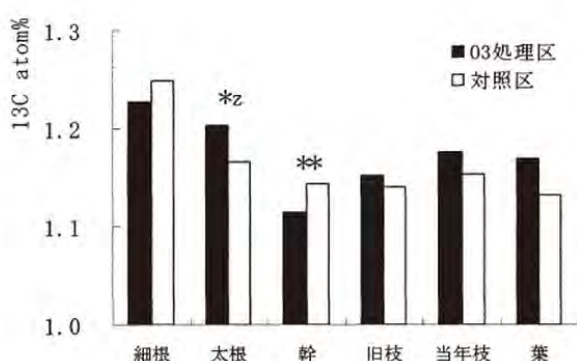


図1 ブナ苗へのオゾン暴露が各部位の ^{13}C atom%に及ぼす影響

z t検定による有意性 (* ; $p < 0.05$, ** ; $p < 0.01$)

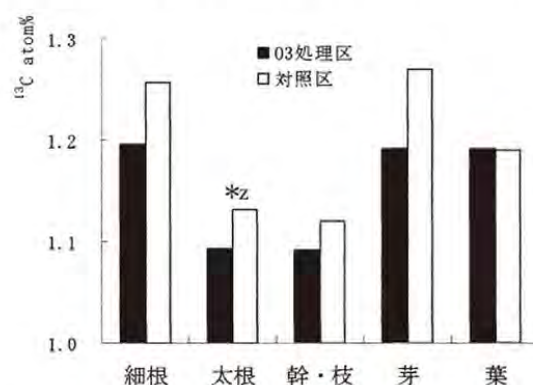


図3 ブナ苗への9月オゾン暴露が各部位における ^{13}C atom%に及ぼす影響

z t検定による有意性 (* ; $p < 0.05$, ** ; $p < 0.01$)

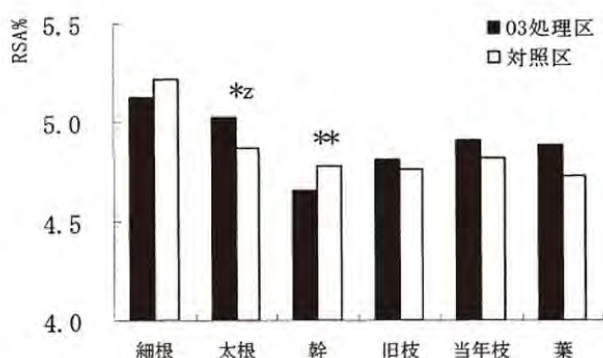


図2 ブナ苗へのオゾン暴露が各部位のRSA(%)に及ぼす影響

z t検定による有意性 (* ; $p < 0.05$, ** ; $p < 0.01$)

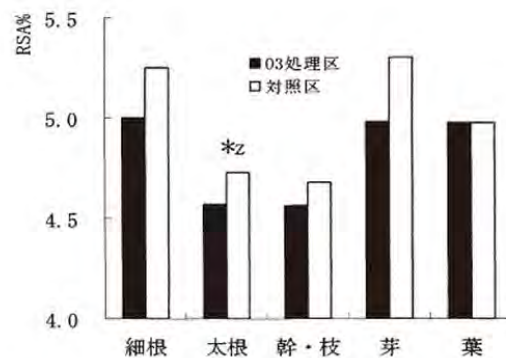


図4 ブナ苗への9月オゾン暴露が各部位におけるRSA(%)に及ぼす影響

z t検定による有意性 (* ; $p < 0.05$, ** ; $p < 0.01$)

は、対照区より有意に低下していた。このことから、ブナ苗に対するオゾンガスが、転流パターンに影響を及ぼしていることと、特に貯蔵器官である太根への転流量を低下させたことが示唆された。また、今回、芽においても対照区より寄与率が低い傾向にあったことが明らかとなった。このことから、ブナ苗に対するオゾンガスの人工的な暴露により、転流パターンが変化していることが示唆された。

3 葉緑素含量 (SPAD値) および蒸散速度

オゾン暴露を9月に3回にわたって行ったところ、可視害とみられる症状は認められなかった。

暴露5日後の9月27日のSPAD値で、オゾン暴露区における値が、無処理区と比較して有意に低かった。蒸散速度については、暴露5日後の9月27日、および暴露13日後の10月5日において、オゾン処理区が無処理区よりもやや低い傾向であったが、有意な差ではなかった(表1)。

結論として、9月に150ppbのオゾンを6時間×3回暴露することにより、ブナ苗のSPAD値に何らかの影響が生じていることが示唆された。これまでの試験成績で示唆されている転流パターンの変化や、推定される地下部への転流量の減少により、貯蔵養分の量や春先の発芽に影響が生じることも考えられるが、今後の課題と考えられる。

4 総合考察

今回は、丹沢大山において大気中オゾン濃度の高まる時期を考慮し、7月および9月にオゾン暴露を行った。

まず、7月においては地上部および太根でオゾン暴露区の¹³C含量およびRSAが上昇し、幹と細根においてはオゾン暴露区の値が対照区のそれらより低下していた。特に幹におけるRSAはオゾン暴露区において有意に低下し、逆に太根では上昇していた。このことから、樹体の骨格部分にあたる幹および太根における同化養分の転流パターンが変化した可能性がある。

9月暴露においては、地上部においては、葉において殆どオゾン暴露区と対照区の差が認められなかったが、他のすべての部位(芽、幹、太根、細根)においてオゾン暴露区が対照区よりも¹³C含量およびRSAが低下していた。

今回の試験においては、7月の暴露試験を行った時点では、葉の付け根に当たる部分に着生する翌年の芽が小さいことから、当年枝に含めて解析を行った。9月の暴露試験では、芽を分離して解析したところ、¹³C含量およびRSAが有意ではないが低下していることが明らかとなった。

オゾン暴露試験の環境条件については、7月暴露と9月暴露を比較すると、相対湿度、光量子密度、オゾン暴露後の¹³CO₂施用までの時間が異なっており、両方の試験結果をそのまま単純に比較することは不可能であるが、どちらの試験結果からも、オゾンの暴露により転流のパターンが変化する可能性があることが明らかとなった。このことから、丹沢大山で観測される高濃度オゾンが、ブナの同化産物の分配パターンに影響を及ぼす可能性が示唆された。

植物の開花期やその後の種子と果実の発達の生殖生長期では、種子あるいは果実が肥大するにつれて、これらの生殖器官は正常な状態の下では光合成

表1 ブナ苗に対するオゾン暴露がSPAD値および蒸散速度に及ぼす影響

測定項目および 測定日	SPAD 値	蒸散速度 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	
		9/27	10/5
オゾン暴露区	38.4 (89) ^z	4.20 (95)	11.5 (91)
無処理区	43.1 (100)	4.41 (100)	12.7 (100)
有意性 ^y	**	n.s.	n.s.

^z 無処理区を100としたときのオゾン暴露区における相対値

^y t検定による有意性(**; $p < 0.01$, *; $p < 0.05$, n.s.; not significant)

産物のシンクとして要求度が高く、葉や根からの光合成産物の転流を増やすとされる。オゾンによってバイオマスが低下する中で、栄養生長期には光合成産物の葉への転流を増加して葉の生長を維持し、生殖生長期には種子への転流を促進することは、オゾンストレスに対する植物の適応反応とされる(野内ら, 2001)。9月の暴露において、葉のRSAが殆ど変わらず、他のすべての器官で低下したことは、ブナ苗がまだ結実のみられない若齢樹であることから、葉の生長において、光合成産物に対する要求が高いことを示している。

また、9月に3回にわたってオゾン暴露を行ったブナ苗において、最終暴露5日後のオゾン暴露区におけるSPAD値が対照区よりも有意に低下していたことは、9月における複数回のオゾン暴露が、SPAD値に影響を及ぼしている可能性を示唆している。

今回のブナを用いた試験において、1回のオゾン暴露により、9月暴露においては葉をのぞくすべての器官においてRSAが低下していたが、7月暴露においては幹のRSAが有意に対照区より低下したのに対し、太根のRSAは増加していた。このように暴露の時期が異なることで転流パターンの変化に違いが見られる要因は不明である。生育ステージや環境条件、シンク器官などが関わっていることが推測されるが、今後の詳細な検討が必要である。

今回の試験は、短時間暴露であり、光合成速度や関連酵素の濃度などについては未調査であるが、今後ブナに対するオゾン影響の試験研究を考える上で重要な示唆を与えている。

今後は、ブナに対するオゾン影響を、苗木による人工的な暴露試験と併せ、屋外試験により長期的な視点で捉えていく必要がある。犬越路の環境省ステーションのオープントップチャンバー(OTC)にブナ苗を植え、これまでと同様、環境中のオゾンガスがブナの成長、光合成速度や蒸散速度に対する影響を定期的に調査し、ブナに対するオゾンの影響について捉えていく必要があると考えられる。また、試験にあたっては、ブナ苗が実生苗であることから、系統間変異や生育のばらつきを考慮し、十分な反復と、均一な生育管理に注意する必要があると考えられる。

結論として、ブナ苗に対するオゾンの短期的な暴

露は、同化産物の転流パターンを変化させ、SPAD値を低下させる可能性が示唆された。

IV 引用文献

- Cooley, D. R., Manning, W. J., (1987) The impact of ozone on assimilate partitioning in plants. A review. *Environ. Pollut.* 47:95-113.
- Gunthardt-Georg, M., Matyssek, R., Scheidegger, C., Keller, T (1993) Differentiation and structural decline in the leaves and bark of birch (*Betula pendula*) under low ozone concentrations. *Trees*. 7: 104-114.
- 伊豆田猛編(2006) 植物と環境ストレス. コロナ社. pp14.
- 関 達哉(2007) オゾン(CO_3)ガスが、ブナ苗の転流パターンに及ぼす影響調査. 丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査. pp89.
- 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.
- 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.
- 野内 勇編(2001) 大気環境変化と植物の反応. 養賢堂. pp88-89.
- Nouchi, I., Ito O., Harazono, Y., Kouchi, H. (1995) Acceleration of ^{13}C -labelled photosynthase partitioning from leaves to panicles in rice plants exposed to chronic ozone at the reproductive stage. *Environ. Pollut.* 88: 253-260.
- Okano, K., Ito, O., Takeba, G., Shimizu, A., Totsuka, T. (1984) Alteration of ^{13}C -acclimate partitioning in plants of *Phaseolus vulgaris* exposed to ozone. *New Phytol.* 97: 155-163.
- 武田麻由子・相原敬次(2000) 酸性霧の樹木葉への影響について. 神奈川県環境科学センター第9回研究発表会講演要旨集. pp. 1-4.
- Yamaguchi, M., Watanabe, M., Matsuo, N., Naba, J., Funada, R., Fukami, M., Matsumura, H., Kohno, Y., Izuta, T. (2007 a) Effects of nitrogen supply

- on the sensitivity to O₃ of growth and photosynthesis of Japanese beech (*Fagus crenata*) seedlings. Water Air Soil Pollut:Focus 7 : 131-136.
- Yamaguchi, M., Watanabe, M., Iwasaki, M., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno, Y., Izuta, Y. (2007 b) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O₃ under different nitrogen loads. Trees. 21:707-718.
- Yonekura, T., 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. 18 : 581-588.

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

谷脇 徹*・山根正伸*・田村 淳*・相原敬次*・越地 正*

Approaches against the outbreaks of *Fagineura crenativora* in the Tanzawa Mountains

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

要 旨

谷脇 徹・山根正伸・田村 淳・相原敬次・越地 正：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 神奈川県自環保セ報告9:81-89, 2012 ブナハバチは丹沢山地における1990年代以降のブナ衰弱枯死への関与が指摘されている。しかし、被食軽減のための対策手法はこれまでに示されていない。そこで本種の生態を踏まえ検討してきた発生予察と防除手法を総括した。まず、発生予察のためのモニタリング手法開発に取り組んだ。そのうえで生態から整理した大規模被食の発生条件をモニタリングにより検証した。定点における繭モニタリングの結果、被食量の少ない地点で繭密度が低く推移し、大規模な被食発生地において繭が高密度で推移することが確認された。また繭の高密度地点での成虫およびブナ展葉モニタリングの結果、被食量の多い2007年は雌成虫羽化と展葉のタイミングが一致し、ピーク時の雌成虫発生量が多いことが確認された。これらの結果は短期の観測ながら今のところ大規模被食の発生条件仮説を満たしている。以上の検討結果から発生予察および防除の考え方を整理するとともに、現在検討している物理的および生物的防除手法を解説した。

I はじめに

丹沢山地の高標高域に成立するブナ林では1990年代以降、稜線部を中心に衰退が顕在化している。衰退の原因として、オゾン、水ストレスおよびブナハバチの複合影響が指摘されている(山根ら, 2007)。なかでもブナハバチはブナを衰弱させるだけでなく枯死に至らしめる要因として注目されており、被食量を軽減するための対策の必要性が高まっている。しかし、本種が新種として記載されたのが2000年(Shinohara et al., 2000)と最近のため生態に不明な点が多く、効果的な対策に結びついていないのが現状である。

一般に葉食昆虫の対策は、幼虫などの葉を食べる発育段階の発生量や発生時期を予測するための発生予察と大量捕殺等の防除からなる。すなわち、本種の生態に応じた発生予察と防除双方の効果的な手法開発が行われなければ、被食量の軽減に結びつけるのは難しい。

そこで本研究ではまず、これまでに明らかとなった本種生態を踏まえ各発育段階のモニタリング手法開発を試みた。そして、これらのモニタリングにより大規模被食の発生条件を検討した。これらを踏まえ発生予察の考え方を整理するとともに、防除についても考え方を整理したうえでいくつかの手法の検討状況を解説した。

II ハバチの生態と大量発生

1 分布

ブナハバチはブナおよびイヌブナの葉のみを食べる狭食性である (Shinohara *et al.*, 2000)。日本固有種であり、北海道、本州、四国、九州のブナ、イヌブナ林に広く生息する (Shinohara *et al.*, 2000)。本種の大量発生は秋田県八幡平や茨城県筑波山 (山上ら, 2005)、栃木県日光 (野澤, 2009)、東京都三頭山 (桃澤, 1999)、奈良県大台ヶ原 (日野ら, 2001) など関東地方を中心とする太平洋側のブナ、イヌブナ林で報告されている。ただしいずれの地域でも大量発生は突発的であり、丹沢山地のように繰り返しの大量発生とそれに伴うブナの衰弱や枯死 (越地, 2002; 越地ら, 2006, 2008; 谷ら, 2008; 山上ら, 2007) が生じる地域は他にない。

2 丹沢山地での大量発生

丹沢山地において本種の大量発生と被食に伴う失葉は、次のとおり1993年以降頻繁に観察されている (越地, 2002; 越地ら, 2006, 2008; 谷ら, 2008; 山上ら, 2007)。すなわち、1997年および1998年には丹沢山を中心に広域で大規模な被食が発生したが2000年にはいったん終息する。その後、2005年まで丹沢山や檜洞丸など局所的に小～中規模に発生する。2006年は被食が完全に沈静化した。翌2007年に檜洞丸を中心に広域で大規模な被食が再び発生する。その後、2008年と2009年は目立った被食は認められず、2010年に丹沢山や檜洞丸において小～中規模の被食、2011年に檜洞丸を中心とする大規模な被食が発生する。丹沢山地のなかでも西部に位置する三国山や菰釣山などでの被食は少ないが、近年では加入道山や大室山など檜洞丸より西方向へと被食が拡大している (谷ら, 2008; 山上ら, 2007)。また、丹沢山地で大規模な被食が発生した1997年と1998年には東京都三頭山 (桃澤, 1999) および奈良県大台ヶ原 (日野, 2001) で、2007年には栃木県日光 (野澤, 2009) でそれぞれ同調的に被食が発生している。

本種が大量発生した林分ではすべてのブナが同程度の被食を受ける訳ではなく、樹冠全体が失葉するブナからほとんど被食を受けないブナまでが混在す

る (越地, 2002; 越地ら, 2006; 山上ら, 2007)。ただし大量発生時の失葉は同一のブナで生じる傾向がある (越地ら, 2006; 山上ら, 2007)。度重なる被食により繰り返し失葉することで衰弱あるいは枯死する事例が丹沢山 (山上ら, 2007) および檜洞丸 (越地, 2002; 越地ら, 2006, 2008) で多数観察されている。丹沢山の堂平では1997～1999年の大量発生に伴う被食の影響と思われるブナの枯死が2000年以降増加し、今後も大量発生に伴う失葉が繰り返されれば枯死木が指数関数的に増加する可能性がある (山上ら, 2007)。このためブナハバチは1990年代以降のブナ林衰退における寄与程度が大きいと考えられる。

3 生活環と被食の関係

本種による失葉被害は突発的に生じることが知られており、これには本種の生活環 (Shinohara *et al.*, 2000) (図1) が関与する。丹沢山地の高標高域において雌成虫は5月中～下旬頃に土中の繭から羽化する。羽化した雌成虫が長く10日～2週間生存する間 (山上ら, 2005)、展開途中のブナ若葉の葉裏葉脈に沿って一卵ずつ、平均35卵 (山上ら, 2005) を産卵する。産卵は気象条件の影響を受け、産卵を妨げない好天時に行われることになる (山上ら, 2005)。卵から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た幼虫は地上に落下し土中浅くに潜って繭を形成する。繭のまま越冬し翌春あるいは数年後の春に蛹化、羽化して成虫となる。

本種の突発発生の傾向は2007年に代表される。すなわち、前年の2006年には成虫、卵、幼虫のいずれもこれまでにないほど低密度にしか観察されていない (山上ら, 2007) にもかかわらず、2007年には大量発生が生じている (越地ら, 2008; 谷ら, 2008)。この原因として、2006年に羽化が抑制され休眠を継続した個体が多く (山上ら, 2007)、2007年になり蓄積された長期休眠繭が一斉に羽化した可能性がある (谷ら, 2008)。また、雌成虫は産卵対象として展開途中の若葉という一時的にしか出現しない資源を利用するので、雌成虫の発生とブナの展葉のタイミングは被食量を左右する要因の一つと考えられている (山上ら, 2007)。

4 大量発生のメカニズム

大量発生の原因に関する直接の調査は今のところ行われていないが、ブナ林の衰退やニホンジカの採食による林床植生の退行といった1990年代以降顕在化した森林環境の劣化(図2)により生態系のバランスが崩れたことで大量発生しやすくなっている可能性が指摘されている(越地ら, 2006; 山上ら, 2007)。このメカニズムは菌に着目すると考えを整理しやすい。後述のように大規模な被食の発生する地点は菌が高密度化しており、条件が揃えば大量発生が生じやすい状態、いわば大量発生ポテンシャルが高い状態にあると解釈できるためである。すなわち、菌の高密度化の原因を探ることが大量発生メカニズム解明の近道と考えられる。

菌の高密度化の原因を本種の生態から整理すると

次の3点に集約される。

一つ目は衰弱によるブナの抵抗力の低下である。ブナが衰弱することで展葉時期が遅れ産卵されやすくなるとともに、タンニンなど摂食阻害物質が減少することで孵化した幼虫の生存率が上昇した結果、菌密度も上昇した可能性がある。

二つ目は土壌環境変化による菌の生存と発育の促進である。高木が枯れ、林床が退行することで地面に太陽光が到達しやすくなり地温上昇と乾燥が起こる。予備調査では温度が高いほど成虫の羽化時期が早く、土壌の乾燥化は終齢幼虫による正常な菌形成を促進している(谷脇, 未発表データ)。

三つ目は森林の階層構造の単純化による天敵の減少である。鬱蒼としたブナの林から低木やササ藪のない開けた林に変化することで藪性の鳥類や小型哺乳

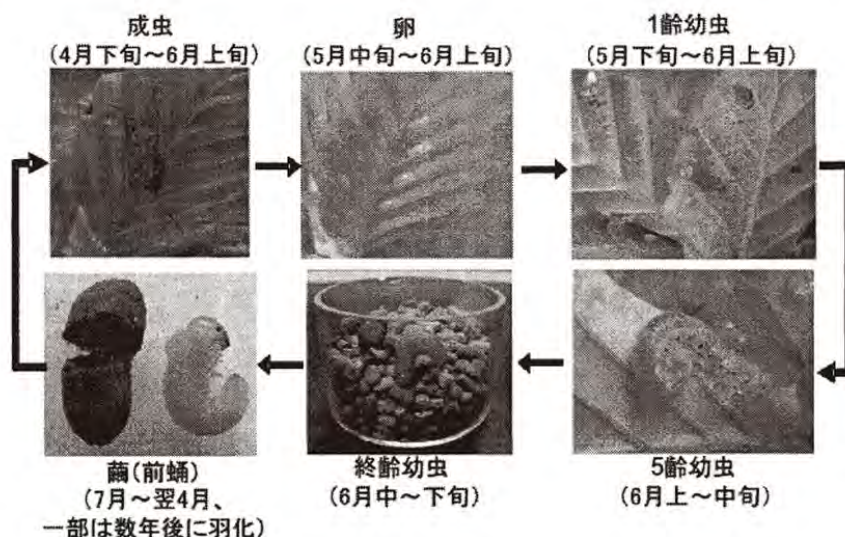


図1 丹沢山地の高標高におけるブナハバチの生活環

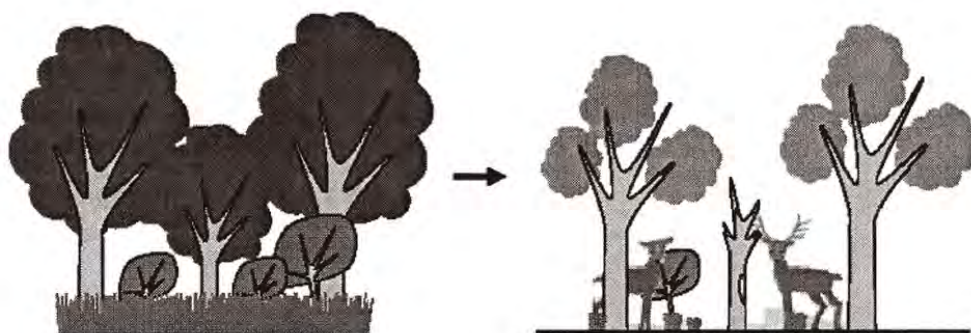


図2 丹沢山地における森林環境劣化の模式図

左が劣化前、右が劣化後を示す。

乳類、天敵昆虫類が減少するとともに、土壌が乾燥化することで寄生菌の活性が低下し繭期の生存率が上昇した可能性がある。

これらの仮説は現在、項目ごとの課題と既往成果を整理し、予備的な調査実験に着手している。

Ⅲ モニタリング手法の開発

1 大規模な被食発生条件

これまでに明らかとなった本種の生態を踏まえ、大規模な被食が発生する条件を次の3つに整理することができる。①繭が高密度で存在すること、②高密度に存在する繭から成虫が大量に羽化すること、③羽化と展葉のタイミングが一致することの3条件である(表1)。すなわち、大量発生に伴う大規模な被食はすべての条件が揃って初めて生じると考えられる。そこでこれらを検証するため繭と成虫、およびブナの展葉モニタリング手法を検討した。

表1 大規模なブナハバチ被食の発生条件

条 件	項 目
第1条件	土中に形成される繭が高密度化しているということ
第2条件	繭から大量の成虫が羽化してくるということ
第3条件	成虫の大量羽化時にブナの若葉が展開途中の状態にあるということ

2 繭モニタリング

繭モニタリングは三国山、菰釣山、大室山、檜洞丸および丹沢山で行った(図3)。いずれの山でも被食量調査が行われており、三国山と菰釣山は被食の少ない山、大室山、檜洞丸、丹沢山は被食の多い山である(谷ら, 2008; 山上ら, 2007)。これらの山はブナ衰退度や植生劣化あるいは回復、大気気象など様々なデータの蓄積があり、環境要素の本種への影響および本種の衰退への影響を解析しやすい。

ここで、山域における繭分布様式は十分に解明されておらず、山域間で繭密度を比較するための調査法が確立されていない現状がある。しかしモニタリングの緊急性が高かったことから、今回は山域のなかでも繭密度が特に高くなると考えられる立地環境に統一してモニタリングを行うこととした。すなわち、被食量は標高が高いほど(谷ら, 2008)、山の中腹よりも山頂や稜線で(谷ら, 2008)、北向き斜面よりも南向き斜面で(田村ら, 2005)それぞれ多くなる。このような地点は幼虫密度が上昇しやすく、各山域のなかでも繭密度が高くなる地点と解釈される。そのなかでもブナの生育密度が高い林分では繭密度はさらに高くなりやすいと考えられる。そこで、各山のモニタリング地点は山頂付近の南向き斜面に生育するブナ高密度林分とした。また、採取土壌は単木スケールにおいて繭が高密度になる樹冠下の地表近くの深さ2cm土壌(谷脇, 未発表データ)に統一した。

以上の手法を用いた繭モニタリングにより、大規



図3 ブナハバチモニタリングの調査地位置図

(a) 神奈川県における丹沢山地の位置、(b) 丹沢山地におけるモニタリング地点の位置

模な被食発生地では繭が高密度で推移することが確認された。すなわち、定点における繭モニタリングの結果、被食量の少ない三国山と菰釣山は繭が低密度で推移する一方、大規模な被食の生じる大室山、檜洞丸および丹沢山では繭が高密度で推移した(図4、谷脇、未発表データ)。さらに、近年発生の中心となっている大室山や檜洞丸では繭密度が上昇傾向にあることが把握された(図4、谷脇、未発表データ)。

このように各山城のなかでも繭密度が高いと考えられる立地環境においては、大規模な被食発生地で繭が高密度していること(条件①)が確認された。

3 成虫と展葉モニタリング

成虫モニタリングは繭高密度地点の一つである丹沢山で行った(図3)。事前調査において成虫を効率よく捕獲する手法を検討したところ、黄色のサンケイ式衝突板トラップを高木が枯れて林床が明るくなった環境(林冠ギャップ)に設置する手法が考案された(谷脇ら、2008)。黄色(Battisti and Rodeghiero, 1998; Digweed *et al.*, 1997; Rodeghiero and Battisti, 2000)や白色(Owens and Prokopy, 1978)にはハバチ成虫に対する誘引効果がある。本種の成虫は黄色、白色、黒色のトラップを設置すると黄色の捕獲数が多くなる(谷脇、未発表データ)ので、黄色には本種成虫を誘引する効果があると考えられる。また、雌成虫は産卵の経験の有無にかかわらず捕獲されるようである。このような生態を利

用したトラップ調査により、年次ごとの成虫発生量や発生時期に関する情報を得ることができる。今回は丹沢山山頂周辺の稜線沿いにある複数の林冠ギャップにトラップを1個ずつ設置した(写真1)。

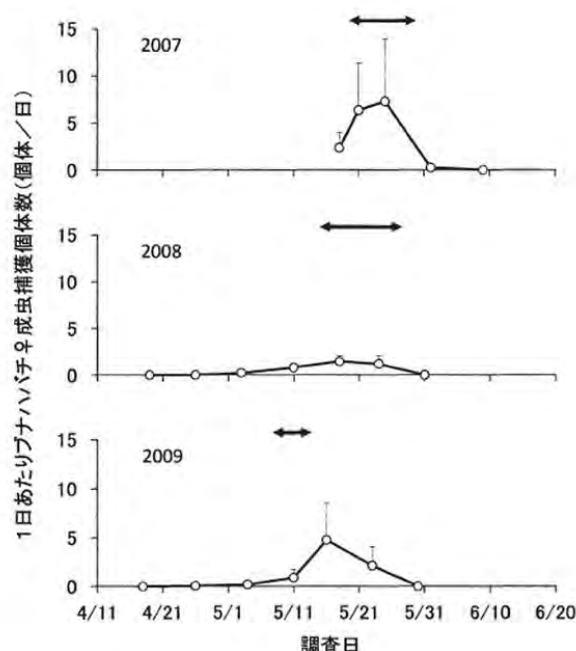


図5 丹沢山におけるブナハバチ雌成虫の捕獲消長(谷脇、未発表データ)

棒線は標準偏差、矢印は産卵可能なブナ若葉の出現ピークを示す。

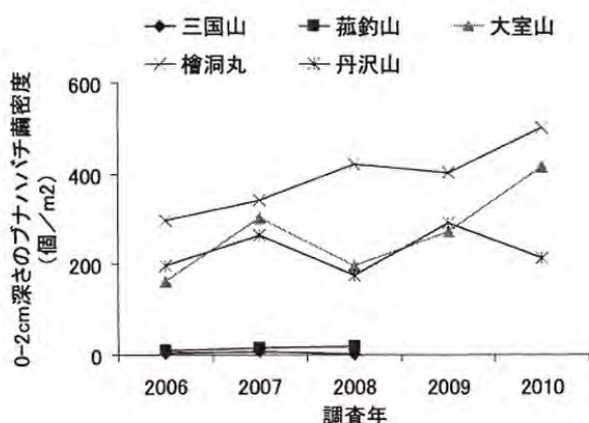


図4 定点におけるブナハバチ繭密度の年次推移(谷脇、未発表データ)



写真1 黄色の衝突板トラップの設置状況

また、トラップ設置箇所の周辺に生育するブナの展葉モニタリングを行った。モニタリング手法は田村ら(2005)の手法を用いた。すなわち、橋詰ら(1996)の6ランクの展葉判定基準により樹冠全体の各ランクの割合を判定し、各ランクに割合を乗じた値の合計を個体の展葉ランクの代表値とした。雌成虫の産卵対象は展葉ランク3(シュートは伸長し、縮んだ葉が半分程度冬芽の外側に現れる。)(写真2)である(Shinohara *et al.*, 2000)。ランク3の状態の葉は個体の展葉ランクの代表値が2~4の段階に出現する。そこで、林分の展葉ランクの中央値がランク2を超えた調査日からランク4を超えた調査日までを産卵可能な若葉が豊富にある期間、すなわち若葉の出現ピークとみなした。

成虫および展葉モニタリングの結果、産卵可能な若葉の出現ピークと雌成虫の捕獲ピークが一致(条件③)するとともにピーク時の捕獲量が多い(条件②)2007年の被食量が多く、雌成虫発生と展葉のフェノロジーが一致してもピーク時の捕獲量が少ない2008年とフェノロジーにずれが生じた2009年の被食量は少なかった(図5、谷脇、未発表データ)。2007年の若葉の出現ピーク中の雌成虫捕獲数は2008年の4~6倍程度、2009年の7~8倍程度であった。一方、2007年の雌成虫合計捕獲量は2008年の2倍程度、2009年の同程度と差は小さかった。このため被食量には雌成虫の発生期間を通じての合計発生量より、若葉の出現ピーク時の雌成虫発生量のほうが強く反映され则认为られる。



写真2 産卵対象となる展開途中のブナ若葉
円の中にブナハバチ卵がある。

4 モニタリングのまとめ

このように繭密度の高い(条件①)丹沢山における成虫および展葉モニタリングでは、羽化と展葉のタイミングが一致(条件③)し、そのときの成虫発生量が多い(条件②)2007年の被食が多くなった。この結果は大規模な被食が発生する3条件(表1)を満たしたことになる。ただし、モニタリング期間中に大規模な被食発生を確認したのはわずか1か年に過ぎず、検証は十分とはいえない。今後もモニタリングを継続し、これら条件を引き続き検証していく必要がある。また、今回の手法により発生量に関する情報を得ることができたが、繭や成虫の分布様式に関する情報はまだ不足している。分布様式調査を進めるとともに、分布に応じたモニタリング手法改良に取り組む必要がある。

IV 予察と防除

1 発生予察

昆虫管理において発生予察は、効果的な防除の時期や地点を予測するのに不可欠となる。また、長期にわたる発生予察としてのモニタリングはそのまま防除効果検証にも活用することができる。本種の場合これまでの生態解明を踏まえ、繭、成虫および展葉、卵モニタリングによる各種段階の被食発生リスク評価手法を検討している(図6)。

まず、各地点の潜在的な被食発生リスクを評価するには繭モニタリングにより繭密度の年次推移を継続的に監視する。これにより、例えば大量発生ポテ

繭密度の継続的な監視
(潜在的な被食発生リスクの評価)



成虫発生消長と展葉フェノロジーの監視
(林分の被食発生リスクの評価)



卵密度の監視
(単木ごとの被食発生リスクの評価)

図6 発生予察フロー

ンシャルの上昇や防除対策による大量発生ポテンシャルの低下を評価することができる。近年は丹沢山地における大量発生に伴う失業被害が西に拡大傾向にある(谷ら, 2008; 山上ら, 2007)ので、繭モニタリングは拡大を監視するのにも役立つと期待される。なお、被食モニタリングはブナ林の衰退リスク評価に役立つが、被食量は年次変動が大きいうえに繭密度と必ずしもパラレルには変動しない。このため、その年あるいは数年間被食量が少ないからといって被食発生リスクが低下したとは必ずしもいえない。各地点の潜在的な被食発生リスクは、被食量を参考にしつつではあるが原則として繭モニタリングから評価する必要がある。

次に、当年の被食発生を予察するには成虫と展葉モニタリングにより成虫の発生量および発生時期と展葉フェノロジーとのタイミングを毎年監視する。このモニタリングでは林分の被食発生リスクを評価することができる。また、林分内でも展葉時期には個体差があり、展葉の遅い個体が被食を受けやすいことが指摘されている(田村ら, 2005; 山上ら, 2007)。このため成虫モニタリングとあわせた展葉モニタリングは林分全体の被食発生リスク評価に加え、個木単位の被食発生予察を可能とする。

ただし、個木ごとの展葉の早遅は必ずしも被食量に反映される訳ではない(山上ら, 2007)。したがって個木単位の被食発生をより高い精度で予察するには個木ごとの卵モニタリングが必要となる。卵モニタリングは5月下旬～6月上旬の展葉の完了直後に葉を採取し、単位葉数あたりの産卵数を測定する(谷脇ら, 2008)。また、幼虫が孵化した後も産卵の痕跡は判別できるので、孵化後から落葉前まで葉の採取あるいはリタートラップによる落葉採取により事後のモニタリングが可能となる。

2 防除対策

一般的な昆虫の防除法として農薬散布がある。しかし、本種の大量発生が生じるブナ林には原生的自然が多く残され、地域固有の動植物と立地環境により多様な自然環境が形成されている。また、当該地域は国定公園や県立自然公園、鳥獣保護地区、保安林など様々な法制度により保護されている。このような地域では農薬散布のように環境負荷の大きい防

除法は原則として避けるべきである。止むを得ず実施する場合でも効果の出る最も低い濃度を事前に調査するとともに、農薬使用に関して関係各位との協議を経る必要がある。このように農薬利用には解決すべき課題が多い。しかし、防除法がなければ本種密度を抑制することができないのでブナの被食量の軽減は期待できない。

そこで環境負荷が小さく、かつ本種の生態に応じた防除法を開発する必要がある。現時点で本種を大量に捕殺できる手法は限られている。一つ目は粘着シートによる幼虫の捕殺である。本種の幼虫は十分に成長し葉の摂食を完了すると、いったん地面に落下したのちブナなどの樹幹によじ登る行動をとる(山上ら, 2001)。このような生態を利用し、樹幹地際に粘着シートを設置すると大量の幼虫を捕殺することができる(写真3)。この方法は摂食を完了した幼虫を捕殺するため当年の被食を回避することはできないが、繭形成密度を低減することになるため次世代の密度抑制には寄与することになる。

もう一つは、黄色のサンケイ式衝突板トラップによる飛翔成虫の捕殺である。前述のとおり、このトラップは産卵前の成虫を含めて誘引捕殺できると考えられるので、当年の卵密度を低下させ被食量の低減に寄与する可能性がある。ただし、これらの手法は設置方法や防除効果の検証が十分に行われている訳ではない。今後、新たな防除法の開発とあわせて検討を進める必要がある。

また、ブナ林衰退地で進めている自然再生事業による森林環境の復元には本種の密度抑制効果を期待できるかもしれない。この考え方は環境改良法と呼ばれる。環境改良法は生物的防除の一種であり、環境を操作することにより土着天敵の有効性を高める



写真3 粘着シートによる幼虫捕獲状況

ことを目的とする(森・村上, 1981)。丹沢山地では森林環境の劣化により生態系のバランスが崩れたことが本種の密度増加を誘導した可能性が指摘されている(越地ら, 2006; 山上ら, 2007)。このことは逆説的に、森林環境を再生し生態系を復元することが本種の密度減少に繋がる可能性を示すものでもある。すなわち、長期的にみれば神奈川県で進めている土壤保全工や植生保護柵、ニホンジカ保護管理といった自然再生事業がブナ林を復元することで天敵を呼び戻し、本種の密度抑制作用が上昇し被食の軽減に寄与するかもしれない。このように自然再生事業は本種の防除対策と一体となったブナ林再生を実現する可能性を秘めている。現在、これら事業による本種の防除効果検証に取り組んでいる。

V 引用文献

- Battisti, A. and Rodeghiero, M. (1998) Monitoring spruce web-spinning sawflies *Cephalcia* spp.: the correlation between trap catches and soil sampling. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 88 (3):211-217.
- Digweed, S., Spence, J. and Langor, D. (1997) Exotic birch-leafmining sawflies (Hymenoptera: Tenthredinidae) in Alberta: distributions, seasonal activities, and the potential for competition. *The Canadian Entomologist* 129(2):319-333.
- 橋詰隼人・李廷鎬・山本福壽 (1996) ブナの開芽期の産地および家系による差異. *日林誌*78(4):363-368.
- 日野輝明 (2001) 森林における鳥をめぐる生物間相互作用ネットワーク. *日本鳥学会誌*50:125-144.
- 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・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*3:11-14.
- 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経過. *神奈川県自然環境保全センター報告*5:3-9.
- 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.
- 森樊須・村上陽三 (1981) 生物的防除における捕食・寄生性天敵の役割と利用. *昆虫学最近の進歩*(石井象二郎編). 東京大学出版会, 東京, pp279-295.
- 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.
- Owens, ED and Prokopy, RJ (1978) Visual monitoring trap for European apple sawfly. *Journal of Economic Entomology* 71(4):576-578.
- Rodeghiero, M. and Battisti, A. (2000) Inter-tree distribution of the spruce web-spinning sawfly, *Cephalcia abietis*, at endemic density. *Agricultural and Forest Entomology* 2(4):291-296.
- Shinohara, A., V. Vikberg, A. Zinovjev and Yamagami, A. (2000) *Fagineura crenativora*, a new genus and species of sawfly (Hymenoptera, Tenthredinidae, Nematinae) injurious to beech trees in Japan. *Bull. Natn. Sci. Mus., Tokyo, Ser. A*, 26(3):113-124.
- 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. *日林関東支論*56:127-130.
- 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被害状況について. *東海大学総合教育センター紀要*28:55-61.
- 谷脇 徹・越地 正・山根正伸・藤澤示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史 (2008) ブナハバチの生息状況調査手法の検討. *関東森林研究*59:239-242.
- 山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2001) 丹沢のブナを食い荒らすブナハバチ. *国立科学博物館ニュース*382:5-7.
- 山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2005) ブナハバチの

- 性比と産卵数（予報）．東海大学総合教育センター紀要25：47-54.
- 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）．財団法人平岡環境科学研究所，神奈川，pp. 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（2007）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）．財団法人平岡環境科学研究所，神奈川，pp. 703-710.

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)

谷 晋*・伴野英雄**・山上 明*

Damage to Siebold's Beech Trees, *Fagus crenata*, by Larvae
of a Sawfly, *Fagineura crenativora* (Hymenoptera)
in the Tanzawa Mountains between 2008 and 2011.

Susumu TANI*, Hideo BANNO** and Akira YAMAGAMI*

要 旨

谷 晋・伴野英雄・山上 明：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) 神奈川県自環保セ報告9:91-94, 2012 丹沢山地で大量発生を繰り返しているブナハバチの食害状況の調査を1997年から継続して行ってきた。今回は2008年から2011年の調査結果を報告する。調査地は鍋割山から三国山までの尾根部と丹沢山堂平の10地点で、調査対象としたブナの被食度を目視により判定した。2007年の大規模な食害の発生以後、2008年と2009年は著しい被害は起きなかった。しかし、2010年では檜洞丸や大室山を中心に食害が再発した。さらに2011年は2007年ほどではないが、広域に渡る大規模な食害が確認された。被害の中心が檜洞丸より西の地域となる傾向がさらに明白になってきた。

I はじめに

丹沢山地におけるブナハバチ幼虫によるブナ葉への食害は、1990年代より注目されるようになった(山上ほか, 2001, 2007; 越地ほか, 2002; 越地, 2006)。筆者らは1997年のブナハバチ幼虫による大規模な食害発生以降、食害状況の調査を継続して行ってきた。2007年までの11年間の食害状況については、既に報告している(山上ほか, 2007; 谷ほか, 2008)。丹沢山地の広域にわたる大規模で著しい食害は、1997年から1998年、2007年に起きたが、いくつかの食害昆虫の見られるような明らかな周期性は見られず、ほとんど被害の無い年から重篤な被害の年まで食害の度合いは突発的に大きく変動する傾向が認

められた。また、1990年代の被害の中心は丹沢山地の主稜尾根の丹沢山および檜洞丸であったが、2000年代に入り丹沢山の被害は以前より軽微となり、檜洞丸に加えて大室山以西の地域で大きな食害が見られるようになってきた。ここでは2008年から2011年のかけての食害状況について報告するとともに、丹沢山地における過去15年間のブナハバチによる食害について検討する。

II 調査方法

食害調査を実施した地点を図1に示した。これらの地点に設定した調査ルートは、山上ほか(2007)および谷ほか(2008)と全く同一である。調査ルー

* 東海大学総合教育センター (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1)

** 桜美林大学自然科学系 (〒194-0294 東京都町田市常磐町3758)

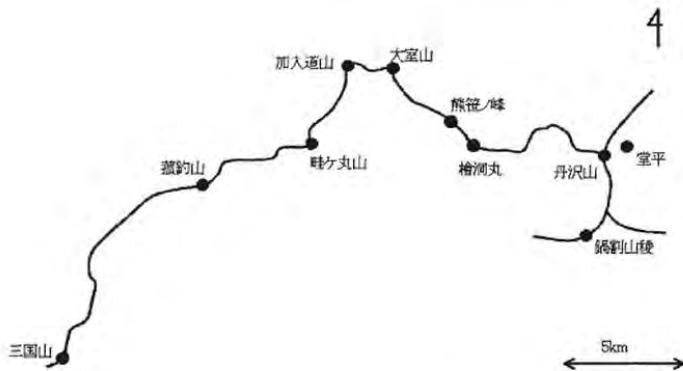


図1 ブナハバチ幼虫によるブナ葉食害の調査地

トの長さは0.5～2.2km、堂平の遊歩道以外は、すべて尾根筋の登山道に沿って設定されている。2008年から2011年にかけて、ブナハバチ幼虫の摂食が終了した7月中旬以降の好天日を選んで調査を実施した。具体的な調査期間は2008年が7月13日～9月9日で、2009年は8月13日～9月1日、2010年は7月18日～8月27日、2011年は7月18日～9月11日であった。調査方法も、山上ほか(2007)および谷ほか(2008)と全く同一で、調査ルートに見られるブナのうち、樹冠が林冠にまで達している成木のブナを100個体以上選んで目視および双眼鏡により精査し、食害状況を調査した。食害の度合いを被食度とし、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0の5段階の数字で表し記録した。被食度1.0はほとんど食害を受けていない、被食度1.5は明らかに食害を受け葉がない部分が見られる、被食度2.0は食害により葉が減少し見通しが良くなっている、被食度2.5は食害により一部を除いてほとんど葉がついていない、被食度3.0は丸坊主の状態である。各地域の被食度とその頻度の積和の平均値を求めて食害指数とした。

Ⅲ 結 果

丹沢山地における過去15年間のブナハバチ幼虫のブナ葉への食害状況を表1に示した。また、2008年から2011年の4年間における食害の発生状況を以下にまとめた。

2008年

鍋割山では調査木すべてが被食度1.0で、ブナ葉にブナハバチ幼虫による食痕は認められたが、被食

度1.5に相当するほどの被害を受けたブナ個体はなかった。丹沢山の山頂付近では、被食度1.5、2.0、2.5のブナが4個体あったが、その他は1.0であった。榎洞丸から三国山までの地域では、加入道山で数個体のブナに明らかな食痕が見られて、そのうちの1個体が被食度1.5であった。それ以外は目立つ食害は認められなかった。これらの結果、食害指数で1.0でなかったのは丹沢山のみ(1.02)であり、他の地域の食害は少なかった(表1)。

2009年

2008年より被害はさらに減少した。加入道山の山頂付近で食痕の目立つ1個体(被食度は1.5未満)が認められただけで、いずれも1.0であり、他の地域ではすべての調査個体で目立つ著しい食害は認められなかった(表1)。

2010年

図2に各調査地点での被食度別のブナ個体数の割合を示した。鍋割山では被食度2.5のブナが1個体見られた。それ以外の個体でも食痕が認められたが、被食度1.5に相当するものはなかった。丹沢山の山頂付近では被食度2.5と激害を受け、二次開葉に至ったものが1個体認められた。そのほかにも被食度1.5には満たないが、明らかな食害をうけたブナが7個体あり、堂平でも被食度1.5未満ではあるが、食痕が目立つ個体が5個体あった。榎洞丸から加入道山までの地域では食害はより明白で、多くのブナに食痕が認められた。特に榎洞丸と大室山の被害が大きく、食害指数はそれぞれ1.10と1.22(表1)であった。いずれも山頂付近での被害が大きく、榎洞丸では被食度1.5以上のブナの割合が13%、大室山では24%に上り、二次開葉した個体もあった。しかし、2007年の大規模な被害発生時に比較すると、ほとんど食害を受けなかったブナ個体も多く、被害は特定のブナに集中していた。加入道山でも明らかな食害が確認されたが、畦ヶ丸から三国山にかけての被害はほとんどなかった。

2011年

2007年以降の重大な食害が広域で発生した。図3に各調査地点での被食度別のブナ個体数の割合を示

表1 丹沢山地におけるブナハバチ食害状況

年	鍋割山	丹沢山	堂平	檜洞丸	熊笹ノ峰	大室山	加入道山	畦ヶ丸	菰釣山	三国山
1997	1.22	2.45	1.54	1.79	1.56	1.32	—	—	—	—
1998	—	1.94	1.54	2.11	1.81	1.08	—	—	—	—
1999	1.01	1.21	1.45	1.08	1.01	1.00	—	—	—	—
2000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—	—	—
2001	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—	—	—
2002	1.00	1.29	1.00	1.47	1.15	1.00	—	—	—	—
2003	1.00	1.19	1.00	1.16	1.09	1.00	—	—	—	—
2004	1.00	1.20	1.05	1.60	1.38	1.28	—	—	—	—
2005	1.02	1.41	1.00	1.38	1.15	1.66	—	—	—	1.00
2006	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—	—	1.00
2007	1.02	1.74	1.19	2.36	2.19	2.64	2.32	1.20	1.36	1.02
2008	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2009	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2010	1.01	1.01	1.00	1.10	1.05	1.22	1.04	1.00	1.00	1.00
2011	1.00	1.53	1.00	2.29	2.24	2.38	1.88	1.57	1.15	1.00

2007年以前のデータは、山上ほか（2007）および谷ほか（2008）による

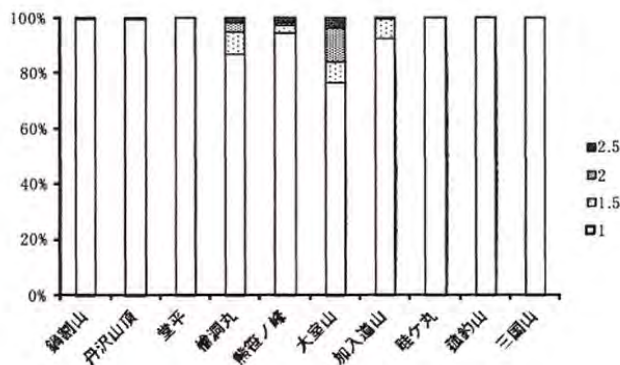


図2 被食度別のブナ個体数の割合(2010年)

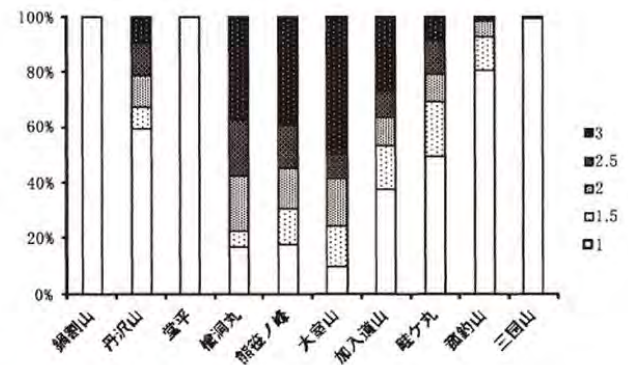


図3 被食度別のブナ個体数の割合(2011年)

した。調査したすべてのブナ個体の被食度が1.0であったのは鍋割山と堂平で、三国山でも被害は軽微であった。しかし、それ以外の地域では、全失葉し二次開葉も確認された個体も多く見られた。被害が特に大きかったのは檜洞丸から加入道山までの地域で、尾根筋のブナの被害が目立った。

大室山では全失葉したブナ個体が半数をこえ、特に山頂付近の南側斜面で被害が大きかった。本食害調査の開始時には生存していたが、現在では枯死してしまったブナ個体が3個体確認できた。さらに、犬越路から大室山に至る尾根筋では南斜面ばかりでなく、尾根や北斜面にも一部被害がみられた。

加入道山も深刻な被害が発生した。畦ヶ丸と菰釣山では山頂付近のブナに重大な食害が見られた。丹沢山の被害は、檜洞丸から畦ヶ丸にかけての地域との比較においては軽微であった。

食害指数は、鍋割山、堂平、菰釣山および三国山以外は1.5以上であった(表1)。1997-1998年と2007年と並ぶ大規模な被害発生となったが、食害指数が2007年を上回ったのは熊笹ノ峰(2.24)と畦ヶ丸(1.57)だけで、2007年の規模には及ばなかった。また、東部の丹沢山周辺の食害が減少し、檜洞丸以西に被害が増大する傾向が明白となった。

IV 考 察

2008年は前年の大規模な食害発生から一転し、丹沢山地全域で食害が見られなかった。同年の5月上旬から下旬にかけて、丹沢山、加入道山および畦ヶ丸で成虫の発生量や産卵密度を調べたが、いずれも確認が難しいほどの低密度であった。これらの地域では2007年に食害指数で1.7以上の激害が発生しているが、樹上で摂食する幼虫の飢餓や病気による大量死は認められなかった。このような突然の食害の終息をもたらした要因については、①終齢幼虫の繭形成時や前蛹での越冬中の死亡率が高かった、②前蛹での長期休眠率が高く2008年の成虫の羽化率が減少したなどが考えられるが、これらは今後の研究課題である。

2009年でもブナハバチ幼虫の密度は低く、食害も発生しなかった。しかし、2010年では多くの雌成虫がブナの新芽に見られ、檜洞丸から加入道山にかけて、規模は大きくないが明らかな食害も発生した（表1）。2011年ではさらに成虫の出現量が大幅に増加し、2007年以来の大規模な食害の発生が起きた。この間に成虫の発生量がどのように変動してきたかは自然環境保全センターから報告される予定である。

過去15年間にわたるの食害指数の変動（表1）から、今回の調査地は3つのパターンに分類できると考えられる。

第一は鍋割山と堂平のように、1997年から1998年にかけてかなりの食害が起きたが、その後はほとんど被害が発生していない地域である。

第二は、丹沢山、檜洞丸、熊笹ノ峰のように食害指数1.2以上の被害が頻発してきた地域である。

第三としては、2006年以前は食害が軽微であった

が、近年被害が目立つようになった大室山より西の地域である。

これらの違いは2007年以前にも認められていたが、より明白になってきた。第一に分類された地域ではブナハバチ成虫の発生量や産卵量が制限されていることを示し、第二の地域ではブナハバチに好適な条件が継続していること、第三の地域では成虫の発生量や産卵量が増加する要因が整ってきたことを示している。ブナハバチの突然の大量発生と終息は、発育や休眠などの生理的特性と季節適応、捕食者や寄生者などの生態学的要因とブナの樹勢衰退や枯死などに起因していると思われる。

V 引用文献

越地 正 (2002) 丹沢山地におけるブナハバチの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: 27-32.

越地 正 (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研究報告3: 11-24.

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, 28:55-61.

山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2001) 丹沢のブナを食い荒らすブナハバチ. 国立科学博物館ニュース, 382:5-7.

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. 丹沢大山総合調査団編「丹沢大山総合学術報告書」財団法人平岡環境科学研究所, 神奈川県, 256-268.