

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

武田麻由子*・十河孝夫*・北見 丘**・美濃口 薫**

Annual trend of atmospheric ozone concentration and estimation of its impact on growth of beech seedlings at Inugoeji

Mayuko TAKEDA*, Takao SOGO*, Ryou KITAMI**, Kaoru MINOGUCHI**

要 旨

武田麻由子・十河孝夫・北見 丘・美濃口 薫：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 神奈川県自環保セ報告 14：27-32, 2016 丹沢山地におけるブナ林衰退の原因のひとつとしてオゾンが挙げられている。ブナ林衰退地に近接する西丹沢犬越路測定局のオゾン濃度等の経年変化を検討したところ、特にブナへの影響が大きいと考えられる4～9月のオゾン平均値やAOT40は2008年をピークに低下していることが明らかとなった。また、オープントップチャンバーを用いてブナ苗に対するオゾンの影響を検討したところ、ブナの年間生長量の浄化区に対する暴露区の比は、4～9月のオゾン平均値やAOT40と負の相関関係があることが確認され、近年のオゾン濃度の低下により、ブナへの影響は小さくなっている可能性が示唆された。さらに、オゾンのブナへの影響を軽減する方法として、日射を遮ることが有効であることが示された。

キーワード：ブナ、オゾン、AOT40、日射

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)。

神奈川県では、西丹沢犬越路測定局(山北町中川、標高920m、以下「犬越路」という。)において1995年から大気汚染物質等の測定を行い(阿相ら2001; 武田ら2013)、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(武田ら2007)。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及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生長期間

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

** 神奈川県農業技術センター (〒259-1204 平塚市上吉沢 1617)

にわたって生育し、生長量を測定したところ、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 (武田ら, 2007)。

犬越路におけるオゾン濃度は、年度による変動はあるものの、経年的には低下傾向にある。その中で、オープントップチャンバーを用いた長期的な野外実験を複数回実施し、犬越路におけるブナに影響を及ぼすオゾン濃度について考察した。

II 犬越路におけるオゾン濃度等の経年変化

犬越路におけるオゾンの年平均値の経年変化を図1に、1時間最高値の経年変化を図2示す。犬越路のオゾン濃度は、2001年度をピークに低下傾向にあった。2013年度は特に低い値 (0.030ppm) を示したが、2014年度は上昇し (0.039ppm)、例年並であった。オゾンの1時間最高値は年度による差が大きいものの横ばいに推移していたが、2006年度をピークに低下傾向を示した。これらの経年的な低下は、神奈川県におけるNOx排出量の削減及びVOC対策の効果であると推測される (武田ら 2013)。

また、オゾンのブナへの影響の指標として、ブナ着葉期である4～9月のオゾン平均値及びAOT40の経年変化を図3に示す。AOT40は40ppbを越える日中のオゾン濃度の6ヶ月積算値を示し、Cはオゾン濃度の1時間値、積算期間は6～18時、4～9月として、下式で算出した。

$$AOT40 = \int (C - 40) dt$$

欧米においては、ヨーロッパブナの苗木を用いた実験によって、1年当たりの成長が10%減少する値として、10 ppm・hが提案されている (Fuhrer *et al.*, 1997)。また、日本の森林の構成樹種を用いた検討では、13 ppm・hが提唱されている (Matsumura *et al.*, 1996; Izuta *et al.*, 1996)。4～9月のオゾン平均値も2008年度をピークに経年的な低下傾向が見られた。さらにAOT40では低下傾向が著しく、近年では日本で提唱されている13ppm・h前後で推移していた。

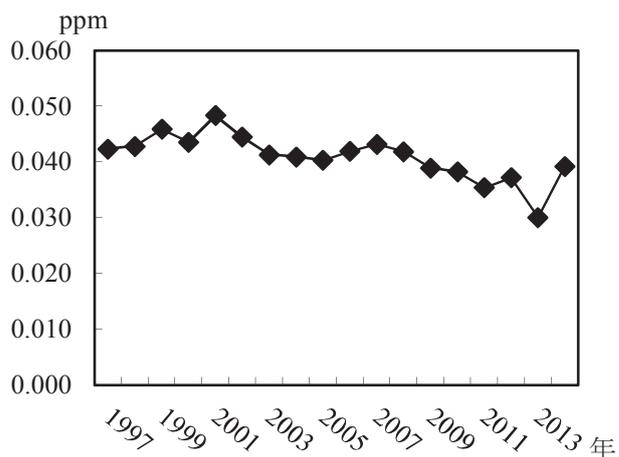


図1 犬越路におけるオゾンの年平均値の経年変化

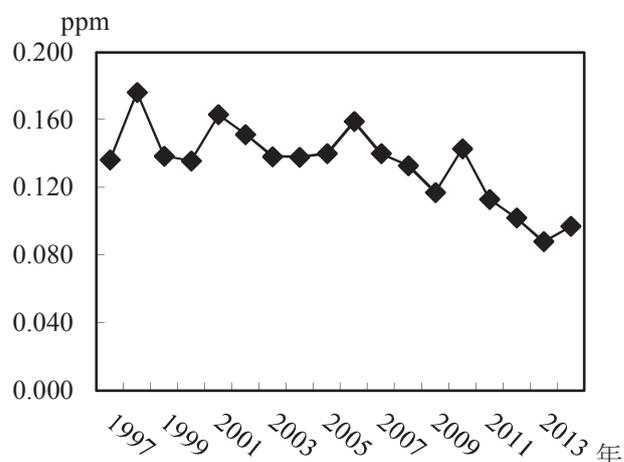


図2 犬越路におけるオゾンの1時間最高値の経年変化

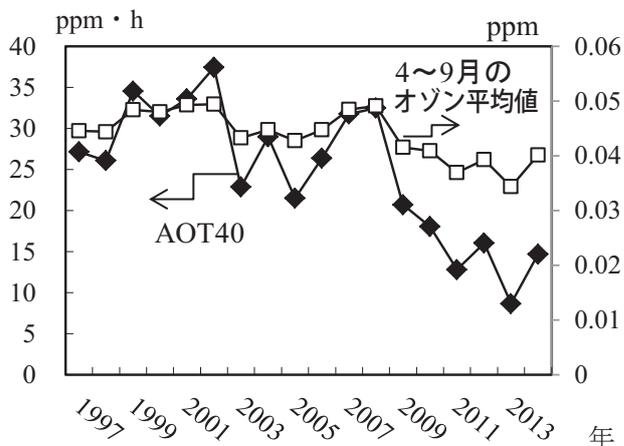


図3 犬越路における4～9月のオゾン平均値及びAOT40の経年変化

Ⅲ 犬越路におけるオープントップ チャンバー実験

1 実験内容

犬越路にオープントップチャンバーを設置し、一方を環境大気をそのまま通気したチャンバー（以下、「暴露区」という。）、もう一方を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チャンバー（以下、「浄化区」という。）とした。表1にオープントップチャンバー実験の詳細を示す。なお、オープントップチャンバーの詳細については、相原ら（2004）を参照されたい。

チャンバー内に、実験Ⅰ及びⅢについては2～3年生丹沢産ブナ苗を、実験Ⅱについては実験開始前年秋にブナ種子をそれぞれ直植えた。ブナ生育量として、実験開始前及び各生長期終了後の冬に樹高及び根元直径を測定し、過去に計測した容積率（樹高×根元直径の2乗）と乾燥重量の相関関係から乾燥重量換算量を算出した。

また、実験Ⅱについては、園芸用寒冷紗（日光透過率50%）を用いて日光をカットした日陰区と対照の日照区を設定し、ブナ生育量に対するオゾンと日照の複合影響についても検討した。

表1 犬越路におけるオープントップチャンバー実験の詳細

	実験期間	チャンバー数
実験Ⅰ	2002～ 2004	暴露区、浄化区 各2、計4
実験Ⅱ	2004～ 2009	暴露+日照区、 浄化+日照区、 暴露+日陰区、 浄化+日陰区 各2、計8
実験Ⅲ	2012～ 2014	暴露区、浄化区 各4、計8

表2 各試験区におけるブナ生育量*及びオゾン濃度、AOT40の状況

(1)実験Ⅰ

試験区	実験前	1年目	2年目	3年目
暴露区	4.3	10	24.4	66.4
浄化区	4.2	10.6	33.4	159.2
オゾン**	-	0.0494	0.0433	0.0447
AOT40***	-	37.4	22.9	29.0

(2)実験Ⅱ

試験区	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
暴露区	0.7	1.9	4.3	15.4	48.1
浄化区	1.0	4.5	20.6	80.2	214.3
オゾン**	0.0447	0.0428	0.0448	0.0485	0.0491
AOT40***	29.0	21.5	26.4	31.7	32.5

(3)実験Ⅲ

試験区	実験前	1年目	2年目	3年目
暴露区	9.5	14.0	83.6	154.3
浄化区	9.0	13.2	106.7	239.7
オゾン**	-	0.0393	0.0344	0.0417
AOT40***	-	16.0	8.7	14.7

*ブナ生育量：乾燥重量換算値（g）

**オゾン：4～9月のオゾン平均値（ppm）

***AOT40：（ppm・h）

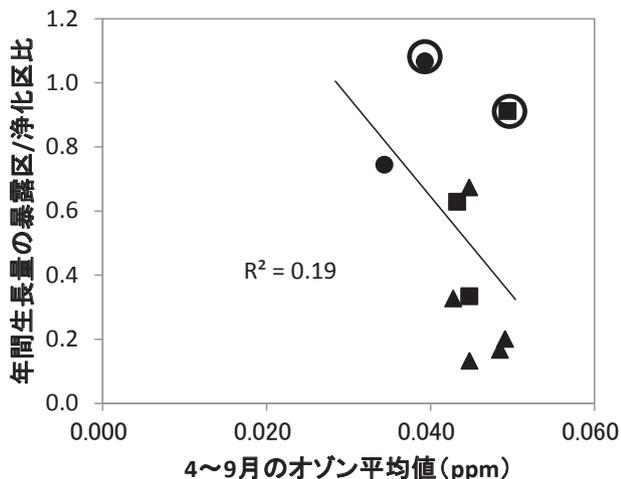


図4 ブナ年間生長量の暴露区/浄化区日とオゾン平均値との関係
 ■：実験Ⅰ、▲：実験Ⅱ、●：実験Ⅲ

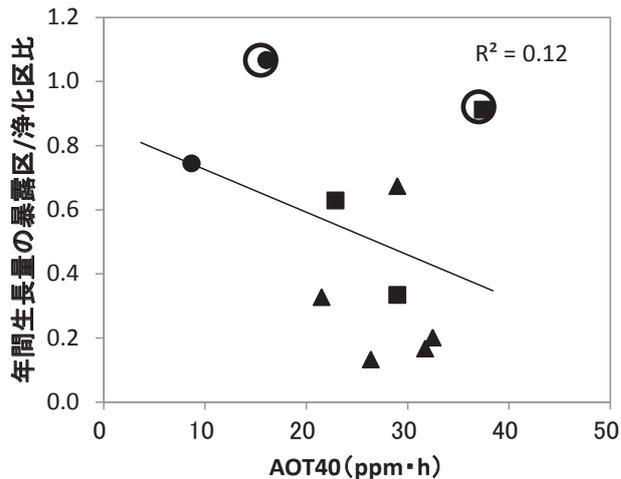


図5 ブナ年間生長量の暴露区/浄化区日と AOT40 との関係
 ■：実験Ⅰ、▲：実験Ⅱ、●：実験Ⅲ

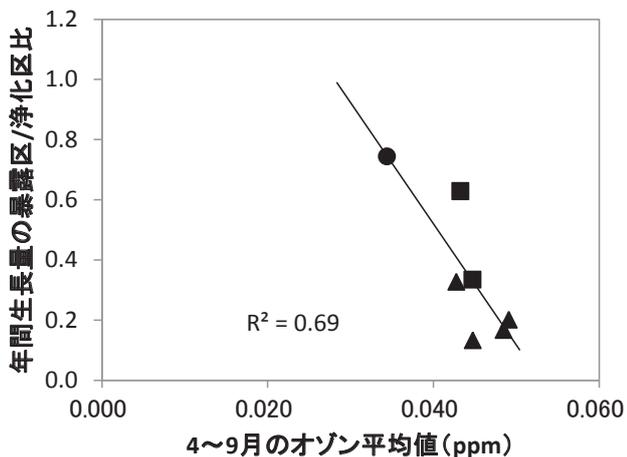


図6 ブナ年間生長量の暴露区/浄化区日とオゾン平均値との関係 (外れ値除外)
 ■：実験Ⅰ、▲：実験Ⅱ、●：実験Ⅲ

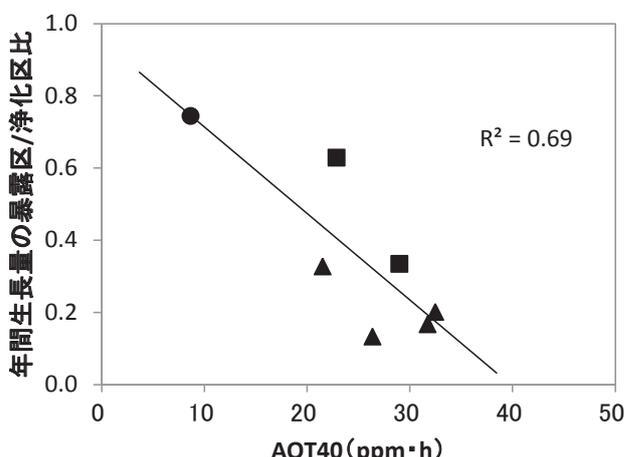


図7 ブナ年間生長量の暴露区/浄化区日と AOT40 との関係 (外れ値除外)
 ■：実験Ⅰ、▲：実験Ⅱ、●：実験Ⅲ

2 ブナ生育量とオゾンの関係

表2に各試験区のブナ生育量、4～9月のオゾン平均値及びAOT40を示した。いずれの実験期間においても、暴露区のブナの生育量は浄化区のそれに比べて小さくなっていることが示された。

続いて、浄化区に対する暴露区の生育量の低下率とオゾン濃度等との関係を検討した。1年目については実験開始前の、それ以降については前年冬の生育量を差し引いた年間生長量を算出し、暴露区の年間生長量を浄化区のそれで除して、年間生長量の暴露区/浄化区比を算出した。図4及び図5に年間生長量の暴露区/浄化区比と4～9月のオゾン平均値、AOT40との相関を示した。実験IIIの3年目については、マイマイガ等の虫害の影響が顕著であったた

め、除外した。

その結果、オゾン平均値及びAOT40のいずれにおいても、値が高くなるにつれ浄化区に対する暴露区の生育量の低下率は大きくなる傾向は見られたが、寄与率はそれぞれ0.19、0.12と良くなかった。これは、実験Ⅰ及び実験Ⅲの1年目の年間生長量(図中○印)が外れているためと考えた。その原因として、ブナ等落葉樹は前年の環境の影響を受けるが、実験Ⅰ及び実験Ⅲのブナ苗は実験開始前年まで同条件で生育していたため、1年目の生長量の低下率が過小評価されたものと考えられる。そこで、各実験期間の1年目のデータを除いたところ、寄与率はいずれも0.69とよくなった(図6～7参照)。この結果から、犬越路において、オゾンがブナ生育量に

影響を及ぼしていることが確認されたが、近年のようにオゾン濃度が低く AOT40 が小さい年にはブナ生育量の低下率が小さくなることが示された。本検討により、4～9月のオゾン平均値が 0.033ppm 程度、AOT40 が 6.4ppm・h 程度で年間生長量がオゾン暴露されていないブナに比べ 2 割低下すると算出された。この結果は、既往の結果（伊豆田ら，2001；武田ら，2007）と比べて、オゾン暴露量に対する生長低下率が大きい。その原因として、上述のように実験 III においてブナ葉に虫害が見られ、オゾン以外の影響が加味されたためと考えられる。

一方、先に述べたように、ブナ等落葉樹は前年の環境の持越し影響があることから、実験開始前からの累積生長量の暴露区／浄化区比と累積 AOT40 の関係について検討した。結果を図 8 に示す。その結果、累積 AOT40 が 100ppm・h まではオゾン暴露によって生長量が低下するが（図中実線丸）、100ppm・h を超過して暴露されると浄化区に対する暴露区のブナの生長低下率は下げ止まる傾向が見られた（図中破線丸）。

3 ブナ生育量に対するオゾンと日照の複合影響

ブナ生育量に対するオゾンと日照の複合影響について検討した。対数変換したブナ生育量の経年変化を図 9 及び表 3 に示す。

浄化区及び暴露区のいずれにおいても、日射を 50% カットした日陰区の方が日照区に比べてブナ生育量が大きくなることが示された。特に暴露区においてその影響は大きく、3 年目以降、日陰区の方が日照区に比べて約 3 倍生育量が大きくなっていった。暴露 + 日陰区のブナ生育量は、浄化 + 日照区に比べて 1～5 年目の平均で約 0.6 倍に低下するに抑えられた。このことから、ブナに対するオゾンの影響を軽減する方法として、日射を遮ることが有効であることが示された。

IV 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、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。

犬越路におけるオゾン濃度が低下傾向にある中で、長期的な暴露実験を複数回実施することにより、

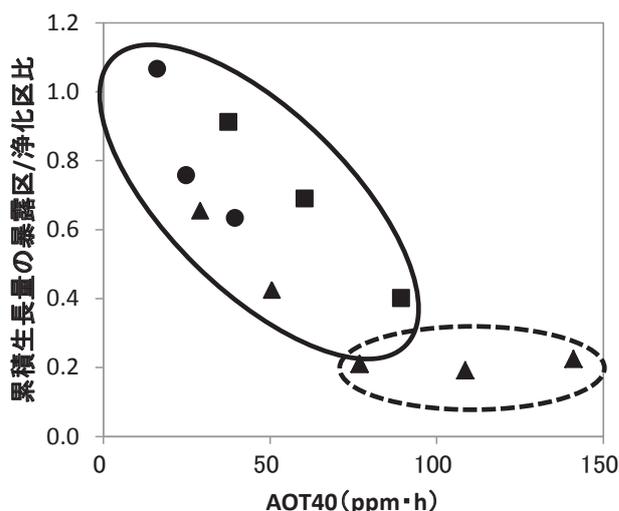


図 8 ブナ累積生長量の暴露区／浄化区日と累積 AOT40 との関係
■：実験 I、▲：実験 II、●：実験 III

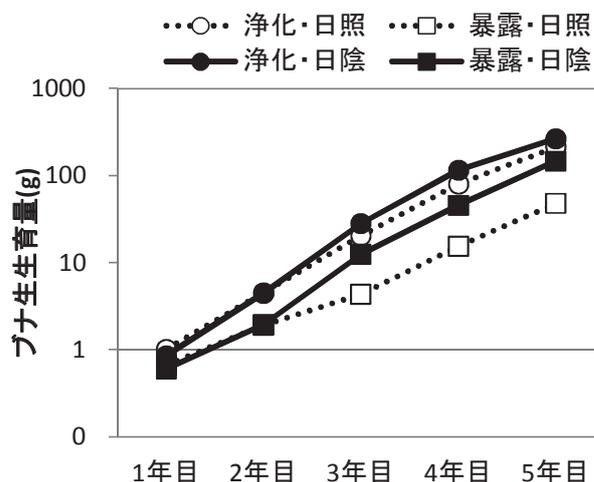


図 9 ブナ生育量に対するオゾンと日照の複合影響

表 3 浄化区及び暴露区におけるブナ生育量の日陰区／日照区比

	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
浄化区	0.8	1.0	1.4	1.4	1.3
暴露区	0.9	1.0	2.9	3.0	3.1

以下の知見を得た。

1. オゾンがブナ生育量に影響を及ぼしていることが確認されたが、近年のようにオゾン濃度が低く AOT40 が小さい年にはブナ生育量の低下率が小さくなっていることが示された。
2. ブナ生育量に対するオゾンと日照の複合影響について検討したところ、ブナに対するオゾンの影響を軽減する方法として、日射を遮ることが有効であることが示された。

V 引用文献

- 相原敬次、武田麻由子 (2004) 可搬型オープントップチャンバー (OTC) の開発. 神奈川県環境科学センター研究報告 27 : 77-81
- Ashmore M., Bell N. and Rutter J. (1985) The role of Ozone In Forest Damage In West Germany. *AMBIO* 14 (2) : 81-87
- 阿相敏明・武田麻由子・相原敬次 (2001) 西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 States: a review. *New Phytol* 139 : 91-108
- Fuhrer J., Skärby L., Ashmore M. R. (1997) Critical Levels For Ozone Effects on Vegetation in Europe. *Environ. Pollut.* 97 (1-2) : 91-106
- 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
- 伊豆田 猛・松村秀幸・河野吉久・清水英幸 (2001) 樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究, *大気環境学会誌*, 36 (2) : 60-77
- Krause G. H. M., Arndt U., Brandt C. J., Bucher J., Kenk G. and Matzner E. (1986) Forest decline in Europe : Development and Possible Causes. *Water, Air and Soil Pollution* 31 : 647-668
- Matsumura H. and 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 CRIEPI. TOKYO, JAPAN* : 190-205
- 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
- 武田麻由子・小松宏昭・岡敬一・阿相敏明 (2013) 西丹沢における大気汚染物質及び酸性雨の状況 (1996 ~ 2011). 神奈川県環境科学センター研究報告 36 : 27-35
- Yonekura T., Honda Y., Okasanen 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. *大気環境学会誌* 36 (6) : 333-351

丹沢山地の風況解析

齋藤正彦*・齋藤央嗣*・相原敬次*・谷脇 徹*

Effects of strong winds in the Tanzawa Mountains

Masahiko SAITO*, Hiroshi SAITO*, Keiji AIHARA*, Toru TANIWAKI*

要 旨

齋藤正彦・齋藤央嗣・相原敬次・谷脇 徹：丹沢山地の風況解析 神奈川県自環保セ報告 14 : 33-36, 2016 丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目的として、汎用流体ソフト (OpenFOAM) を用いて、丹沢山地の風況を再現し、丹沢山地の風衝地の解析を行った。出現頻度が高い南風と南西風の解析を行った結果、せん断応力 (風速シアーによる下向きの力) の高い箇所は、これまでに報告されている丹沢山などの草地化が進んでいる箇所と一致した。

キーワード：ブナ、ブナ枯れ、オゾン、風、風衝地

I はじめに

丹沢山地の塔ヶ岳から檜洞丸にかけての主稜線部でブナ林の衰退が進行しており (越地ら 1996)、その要因の一つとして、これまでに高濃度のオゾンによる影響が指摘されている (丸田ら 1994、相原ら 2004 ; 河野ら 2007)。オゾンによる影響は、濃度や暴露量 (AOT40) といった指標による評価が行われてきた (阿相ら 2005 ; 河野ら 2007)。これらは、丹沢山地の頂上付近を複数点について短期間測定した結果や犬越路局 (標高 920m) の長期間測定した結果を解析したものである。

ブナの着葉期 (春から秋) について、丹沢山地全域のオゾン濃度の様子を調べるために、気象モデルと大気質モデルを用いてオゾン濃度の推定が行なわれた (齋藤ら 2012)。モデルによる結果は、実測データとよく一致し、モデルの丹沢山地への適用性が確認された。また、丹沢山地では麓の市街地に比べ、オゾン濃度の日変化が小さい特徴があり、そのメカニズムもモデル解析から解明した (齋藤ら 2012)。さらに、オゾンによる樹木への影響を調べるために、

オゾンの暴露量より評価方法として優れていると考えられている葉の気孔からのオゾンの取り込み量を推定した (齋藤ら 2013)。オゾンの取り込み量は標高が高いほど大きく、標高が高いほど樹木の衰退が著しい観察結果と一致した。また、丹沢山地全体でクリティカルレベル (伊豆田と松村 1997) が大きく上回っていることも明らかになった。

風による影響は、森林衰退の複合影響をとらえる観点から、オゾンと同様に重要な要素であると考えられる (河野ら 2007 ; Suto *et al.* 2008)。Sutoら (2008) は、詳細な流体シミュレーションを行い、稜線上のブナの衰退域はオゾンの相対濃度よりも風速の強い所と一致していると報告している。このため丹沢山地全域のオゾンの植物影響を考察するために、風況の解析が重要となると考えられる。

そこで丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目的として、丹沢山地の風衝地の解析を行った。丹沢山地は、急峻な地形により斜面上昇気流が発達し風速が強い風衝地が点在していることが知られている。本研究では、汎用流体ソフト (OpenFOAM) を用いて、丹沢山地の風

況を再現し、風の解析を行った。

II 調査方法

1 地図データ作成

汎用流体ソフト (OpenFOAM) で利用するための地形データを作成する必要がある。本研究では、地表面の凹凸を表現するために snappy Hex Mesh を採用した。これにより、地表付近では、地形に沿った細かなメッシュ点を生成し、上空では粗いメッシュ点を設定した。メッシュ生成の作業効率を上げるため、オープンソースの GUI である HELYX-OS を用いた。風向は、丹沢山地で出現頻度が高い南風と南西風の2風向について地形を作成した (図1)。これは、設定した計算領域へ風が垂直に吹くようにするためである。

2 計算モデルの作成

メッシュの作成手順としては、まず標高データ (CSV 形式) から STL ファイルを作成し、その後 OpenFOAM 付属のメッシュャである snappy Hex Mesh で丹沢地形のメッシュを生成した (図2)。計算領域は、地表面から上空 5km までとし、地上から 2.4km までは blockMesh と snappy Hex Mesh を使い、さらに上空は extrudeMesh を用いて高さ 5km までメッシュを作成した。

風の流れは音速に比べはるかに弱いため、非圧縮流体として扱う。また、風向がある程度一定に吹くものと仮定して、風の流れは定常とした。乱流モデルには計算が安定な $k-\omega$ SST モデルを用いた。

なお、本研究の地形の作成と計算は、株式会社 CAE ソリューションズに委託して実施した。

III 結果及び考察

1 丹沢山地の地図

風向は、丹沢山地で出現頻度が高い南風と南西風の2風向について地形を作成した。これは、設定した計算領域へ風が垂直に吹くようにするためである。作成した地図データを図1に示す。

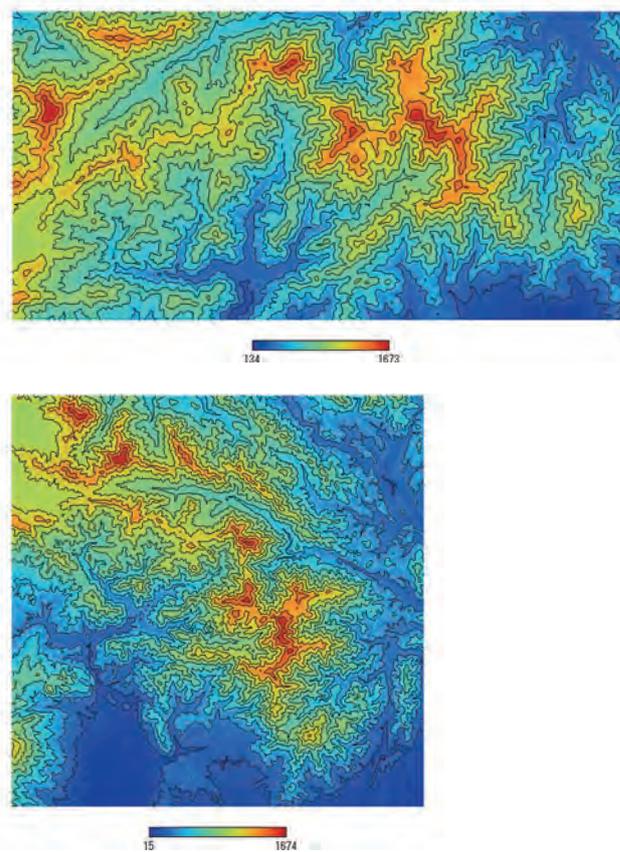


図1 地形図

風向が南の場合の地形 (上段)、風向が南西の場合の地形 (下段) を表している。凡例の数値は標高を表す。南風の場合は、下側から上側へ一様風速で与えている。また、南西風の場合は、左側から右側へ一様風速で与えている。

2 丹沢山地の風況計算

作成した丹沢地形のメッシュを図2に示す。また、計算領域を図3に示す。

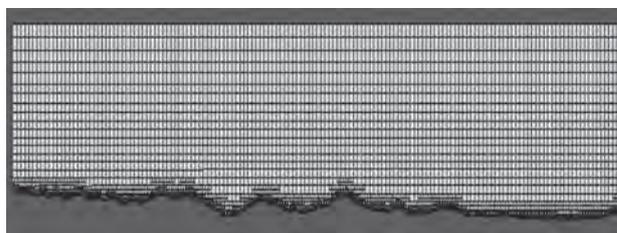


図2 snappy Hex Mesh 法による鉛直断面のメッシュ配置

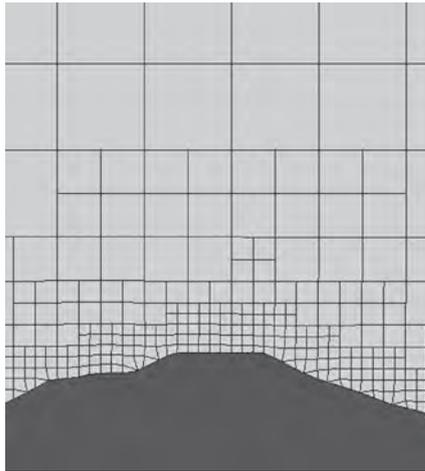


図2 (続き) 詳細なメッシュ配置

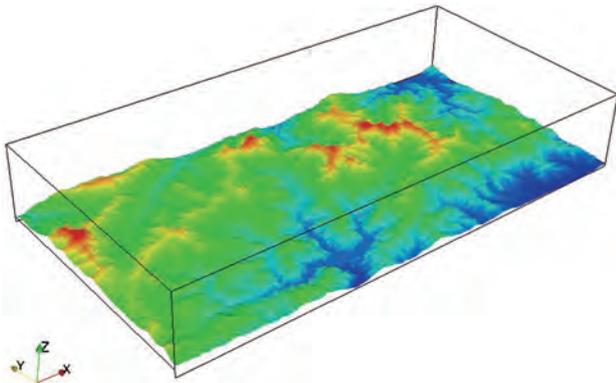


図3 計算領域 (南寄りの風の場合)

3 南風の計算

過去の気象観測データなどを参考に流入風速を10m/sとした。計算にはOpenFOAM-2.3のsimpleFoamを使用した。XeonのLinuxワークステーションで、8コアで1,200step程度まで実行して、wallclockで大体3時間程度である。

図4に地表面のせん断応力の分布を示す。地表面のせん断応力は、風速シアーが大きい地表面付近での空気粘性による地表面を押し力 (Shear Stress) の大きさを示しており、風衝による倒木に影響する物理量と考えた。地表面のせん断応力が大きい所は、稜線に沿っていることが分かる。南風では、鍋割山の裏奥に位置する丹沢山から蛭ヶ岳に掛けて強いせん断応力が掛かっていることが明らかになった。また、大室山から菰釣山に掛けての稜線でも強いせん断応力が掛かっていることが明らかになった。



図4 地表面せん断応力分布 - 南風

4 南西風の計算

南西風の場合を計算するために、地形をZ軸周りに45度回転させた計算形状を作成して計算した(図1)。流入風速は、南風の計算と同様に、10m/sとした。図5に地表面のせん断応力の分布を示す。大室山から菰釣山に掛けての稜線で強いせん断応力が掛かっていることが明らかになった。丹沢山、蛭ヶ岳、檜洞丸などでは、南風の時の地表面のせん断応力の分布(図4)に比べ、南西風の時の方が小さい。

南風、南西風ともに、山頂付近でせん断応力が強く、せん断応力の高い所は、これまでに報告されている丹沢山などの草地化が進んでいる箇所(山根ら2012)と一致し、Suto *et al.* (2008) に比較してより明確に風の影響を明らかにすることが出来た。



図5 地表面せん断応力分布 - 南西風

IV 謝 辞

ArcGIS による作図では(有)GIS インスティテュート雨宮有氏にお世話になった。ここに記して感謝の意を表します。

V 引用文献

- 相原敬次, 阿相敏明, 武田麻由子, 越地 正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (II) 神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象, 大気環境学会誌, 39, A29-A39
- 阿相敏明, 内山佳美, 齋藤央嗣 (2005) 丹沢のブナ衰退の機構解明のためのオゾン濃度分布調査. 第 46 回大気環境学会年会講演要旨集, p. 386.
- 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
- 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, pp. 383-395
- 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.
- 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) 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 (2) : 241-250.

- Suto, H., Y. Hattori, N. Tanaka & Y. Kohno, (2005) Effects of strong wind and ozone on localized tree decline in the Tanzawa Mountains of Japan. Asian Journal of Atmospheric Environment 2 (2) , 81-89
- 齋藤正彦, 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 (5) , 217-230.
- 齋藤正彦, 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 (6) , 251-259
- UNECE (2010) Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends, Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation, Revision undertaken in Summer, 2010, to include new flux-based critical levels and response functions for ozone. International Cooperative Program on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, pp.113
http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/mapping_manual.html
- 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.

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)

谷 晋*・伴野英雄**

Damage to the Beech *Fagus crenata* caused by a Sawfly *Fagineura crenativora* in the Tanzawa Mountains, Central Japan (2014-2015)

Susumu TANI* and Hideo BANNO**

要 旨

谷 晋・伴野英雄：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（2014-2015）
 神奈川県自環保セ報 14：37-40, 2016 神奈川県丹沢山地で継続して行ってきたブナハバチ幼虫のブナ葉への食害状況について、2014年と2015年の結果を報告した。2014年は西丹沢の檜洞丸、熊笹ノ峰、大室山、加入道山および畦ヶ丸で食害を受けたブナ個体が見られたが、その割合は大きくても12%（食害指数1.11以下）であった。2015年は丹沢山から菰釣山までの広域で食害が発生した。被害が大きかったのは大室山（食害指数1.56）と加入道山（食害指数1.47）で、食害を受けたブナ個体が48～51%あった。これに次ぐ被害が見られた檜洞丸（食害指数1.38）と丹沢山（食害指数1.23）を含めた4地点では、全失葉したブナ個体が5～10%あり、その多くは二次開葉した。2015年の食害は、2013年などの過去5回起きた食害指数2.00以上の激害に比べると小規模なものであった。

I はじめに

ブナハバチ *Fagineura crenativora* は、神奈川県丹沢山から2000年に新属新種として記載されたハバチで、全国のブナ林に広く分布し、その幼虫はブナとイヌブナの葉だけを食べる (Shinohara *et al.* 2000)。丹沢山地では、ブナハバチの大量発生が1993年以降頻発してきた (越地 2002、越地ら 2006、2008；山上ら 2007；谷ら 2008、2012a、2013、2014)。度重なる重大な食害を受けたブナが衰弱して枯死に至ることが、丹沢山や檜洞丸から報告されている (越地 2002；越地ら 2006、2008；山上ら 2007)。

われわれは自然環境保全センターと共同でブナハバチの生活史を解明するとともに (山上ら 2005；谷ら 2009、2012b；谷脇ら 2013、2014)、食害発生

の定点モニタリングを1997年から行っている (山上ら 2007；谷ら 2008、2012a、2014)。今回は、2014年と2015年の食害状況について報告する。

II 調査地と方法

丹沢山地の10地点 (図1、標高1,100 m～1,550 m) で、ブナ林内の登山道に調査ルートを設定し、ブナハバチ幼虫の摂食が終了した2014年と2015年の7月から9月にかけて食害の程度を調べた。用いたルートは山上ら (2007) と谷ら (2008、2012a、2014) と同一である。ただし、2015年は熊笹ノ峰における調査をしていない。

食害の調査方法は山上ら (2007) に従い、各ルートで枝先が樹冠まで到達しているブナ成木100個体以上を対象に、目視および双眼鏡により葉を詳細に

* 東海大学現代教養センター (〒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 東京都町田市常盤町3758)

III 調査結果と考察

1 2014年の食害状況

2014年におけるブナハバチ幼虫のブナ葉への食害状況を表1に示した。被食度1.5以上の食害を受けたブナ個体が見られたのは西丹沢の檜洞丸から畦ヶ丸にかけての地域であった。その中で被害が大きかった加入道山（食害指数1.11）と大室山（食害指数1.08）では12%のブナ個体で食害が確認され、被食度2.0～2.5の比較的激しい食害を受けたブナ個体が4～6本あった。鍋割山、丹沢山、堂平および三国山では食害が確認されたブナ個体はなかった。

2 2015年の食害状況

2015年における食害状況を表2に示した。鍋割山、堂平および三国山では被害が認められなかったが、他の地点では被食度1.5以上のブナ個体があった。特に被害が大きかった丹沢山、檜洞丸、大室山および加入道山の4地点における被食度別ブナ個体の割合を図2に示した。食害を受けたブナ個体の割合は、最も被害が大きかった大室山（食害指数1.56）で51%、次に大きかった加入道山（食害指数1.47）で48%、檜洞丸（食害指数1.38）では37%で、最も少なかった丹沢山（食害指数1.23）で25%であった。



図1 ブナハバチ食害調査地点

観察して、個体別の被食度を5段階で評価した。被食度1.0は食害が明らかでない状態、被食度2.0では木全体が著しく食害され、葉が透いて見える状態、被食度3.0は葉がすべて食べ尽くされた状態とし、これらの中間段階として1.5と2.5を設けた。この段階評価の基準も、谷ら（2008、2012a、2014）で用いたものと同じである。また、各地点の代表値として個体別被食度の平均値を算出し、これを食害指数とした。

表1 ブナハバチ幼虫によるブナ葉への食害状況（2014年）

被食度	8月15日 鍋割山	8月17日 丹沢山	8月17日 堂平	7月6日 檜洞丸	7月6日 熊笹ノ峰	7月13日 大室山	8月7日 加入道山	8月13日 畦ヶ丸	8月11日 菰釣山	8月11日 三国山
1.0	132	128	155	120	98	101	92	113	129	119
1.5	0	0	0	3	6	10	7	1	0	0
2.0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0
3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
総個体数	132	128	155	123	104	115	105	114	129	119
食害指数	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.08	1.11	1.00	1.00	1.00

注 調査地点の上の日付は食害調査の実施日

表2 ブナハバチ幼虫によるブナ葉への食害状況（2015年）

被食度	9月2日 鍋割山	8月24日 丹沢山	7月19日 堂平	8月11日 檜洞丸	— 熊笹ノ峰	8月14日 大室山	8月16日 加入道山	7月26日 畦ヶ丸	8月23日 菰釣山	8月15日 三国山
1.0	127	98	122	78	—	51	62	116	118	129
1.5	0	20	0	20	—	22	28	1	3	0
2.0	0	5	0	11	—	11	15	0	0	0
2.5	0	1	0	8	—	11	6	0	0	0
3.0	0	7	0	7	—	10	9	0	0	0
総個体数	127	131	122	124	—	105	120	117	121	129
食害指数	1.00	1.23	1.00	1.38	—	1.56	1.47	1.00	1.01	1.00

注 調査地点の上の日付は食害調査の実施日

また、5～10%の割合で全失葉したブナ個体（被食度3.0）が認められ、その多くは夏期に二次開葉していた。被害は2013年以前と同様に、東西に連なる主稜尾根の南側（海側）斜面で著しかった。

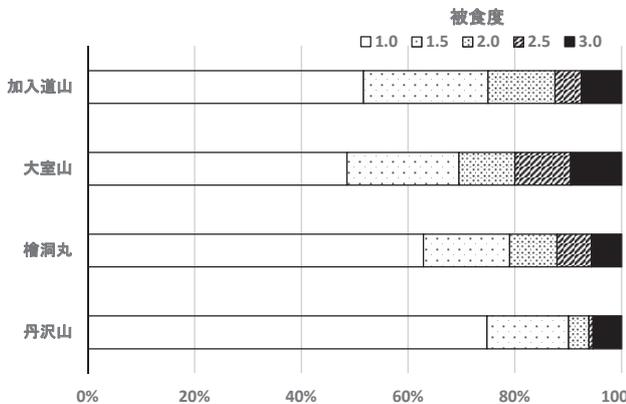


図2 被食度別ブナ個体数の割合（2015年）

3 食害の経年変化

図2の4地点では、これまでも重大な被害が繰り返されてきた。これらの地点の1997年から2015年までの19年間の食害指数の変動を図3に示した。加入道山は2007年から追加して調査を始めたため、それ以前のデータはないが著しい食害は発生していなかったと推測される（谷ら 2008）。2015年の被害規模は、1997～1998年、2007年、2011年および2013年に起きた食害指数で2.00をこえる著しい食害に比較してはかなり小さく、2004年や2005年と同規模のものであった。

2006年以降の食害発生の年次変動パターン（谷ら 2008、2012a、2014）から、ブナハバチの幼虫密度は数年をかけて漸進的に増加するのではなく、前年度の低密度から突発的に大量発生密度へと移行し、1年限りで再び低密度へ戻るといった傾向が続いてきたと考えられる。これには、i) 越冬中の前蛹密度と生存率が単純に翌年の幼虫密度に反映されるのではなく、前蛹の長期休眠率と越冬後の休眠覚醒率の変動により成虫の羽化率が大きく影響される（谷ら 2012b）、ii) 産卵密度も雌成虫の羽化時期とブナ開葉との同調性や産卵時の気象条件に制約される（山上ら 2007；谷脇ら 2013）、iii) ニホンジカの食害などによる植生退行に伴う土壌環境の変化が前蛹の生存率に影響する（谷脇ら 2014）など、複合的な要因が関係している。

ブナハバチ幼虫の大量発生が2016年に一旦終息

したとしても、複合的な条件が整えば1～2年後にでも再発する可能性はかなり高いと考えられる。

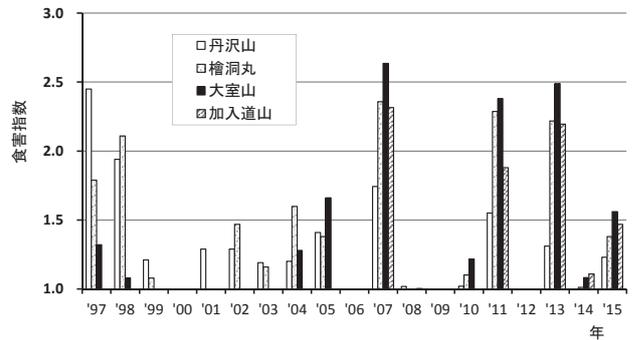


図3 丹沢山地におけるブナハバチ幼虫の食害指数の経年変化

2013年以前のデータは谷ら（2008、2012a、2014）と山上ら（2007）による

また、2007年以降は丹沢山での被害が減少する一方で、西丹沢での被害が増加する傾向が認められる。今回の調査でも、丹沢山に比べて大室山を中心とする西丹沢での被害が明らかに大きかった。今後は畦ヶ丸以西での食害の激化が危惧される。

4 大室山でのブナ枯死進行

1990年代に著しい食害を受けた丹沢山では、2000年以降にブナの枯死が急速に進行した（山上ら 2007）。著しい食害が現在でも継続している檜洞丸でのブナ枯死も深刻な状況である（越地ら 2006、2008）。これらに加えて、近年食害が激化してきた大室山でも、ブナの枯死が加速している。われわれが調査対象としてきた南側斜面のブナ林では、ここ数年間で30個体以上のブナが枯死し、ギャップが拡大している（谷ら 未発表データ）。加入道山でも同様にブナの衰弱が進み、枯死する個体が見られるようになった。これらの地域は丹沢山地のブナ林保全の新たなホットスポットとして注視していく必要がある。

丹沢山地におけるブナハバチの発生予察のモニタリングや防除に関する調査研究はブナの衰弱枯死が進んだ丹沢山と檜洞丸を中心に行われてきた（谷脇ら 2012；谷脇 2015）。今後、同様なモニタリングを大室山以西の地域にも拡大し、継続的に監視していく必要があると考える。また、ブナハバチの防除対策として粘着シートによる幼虫の捕殺、衝突板トラップによる飛翔成虫の捕殺が行われてきたが（谷脇ら 2012；谷脇 2015）、幼虫の大量発生の抑制と

いう点では十分でなかったように思われる。大室山や加入道山でブナ枯死が連鎖的に進行することを防止するために、環境への負荷に十分に配慮した上で、自然環境保全センターで試験研究が行われているブナ樹幹への薬剤注入という防除法(谷脇 2015; 谷脇ら 2015)の適用も検討すべきである。

IV 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経過とブナの被害実態. 神奈川県自然環境保全センター報告 29 : 27-32.
- 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・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.
- 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. Bull. Natn. Sci. Mus., Tokyo, Ser. A, 26(3):113-124.
- 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 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 : 107-114.
- 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被害の経年変化. (2008-2011) 神奈川県自然環境保全センター報告 9 : 95-98.
- 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 晋・山上 明・伴野英雄 (2013) 葉食昆虫の食害と樹木の枯死 - ブナハバチとサクラソギ. 森林科学 67 : 18-21.
- 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被害状況 (2013年). 東海大学総合教育センター紀要 34 : 159-162.
- 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害に及ぼす影響. 昆虫 (ニューシリーズ) 16 (4) : 218-224.
- 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・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 (2) : 75-80.
- 谷脇 徹 (2015) 丹沢山地におけるブナハバチの大発生と防除法の開発. 森林防疫 64 (5) : 165-173.
- 谷脇 徹・猪野正明・鶴田英人・齋藤央嗣・相原敬次・岡田充弘 (2015) ブナ若木へのジノテフラン樹幹注入によるブナハバチの防除効果. 樹木医学研究 19 (3) : 139-148.
- 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. 256-268. 丹沢大山総合学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 794pp, 平岡環境科学研究所, 相模原.

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

上田正文*・城向光弥*,**・水野沙保里*,***

Techniques of diagnosis of water stress in trees suitable for the declining beech forests at mountainous regions in the Tanzawa Mountains

Masafumi UEDA*, Mituya SHIROMUKAI**,** and Saori MIZUNO*,***

要 旨

上田正文・城向光弥・水野沙保里：丹沢山地におけるブナ林の衰退原因解明のための山岳地域に適した水ストレス診断技術の開発 神奈川県自環保セ報告 14：41-48, 2016 丹沢山地におけるブナ林の衰退原因の一つと考えられている水ストレスについて、実際に丹沢山地に生育するブナに生じているか否かを判定するために必要な山岳地域に適した診断手法について議論した。ここでは、樹木体内の水の流れに関係する事象を概説したうえで、水ストレスにより樹木が衰弱・枯死に至る流れ一例を検討し、山岳地に生育するブナの水分状態を把握するのに適した手法として、水分通道組織である道管・仮道管のキャビテーション感受性および木部構造観察による水ストレス診断手法を提案した。

I はじめに

近年、世界中で森林の衰退現象が報告されている (Manion and Lachance 1992)。しかし、森林の衰退原因については明らかでない場合が少なくない (松本ら 2002)。日本においても森林の衰退現象が各地で確認されており (堀田ら 1993)、神奈川県北西部に位置する丹沢山地においてもブナ林の衰退が報告されている (越地ら 1996)。丹沢山地では 1970～1980 年頃からブナ林やモミ林を中心に衰退が目立ち始め (越地ら 1996、相原ら 2004)、ブナ林については、1990 年代以降も衰退が拡大する傾向にある (鈴木・山根 2013)。丹沢山地におけるブナ林の衰退原因として、光化学オゾン等の大気汚染 (丸田ら 1999、清水・伊藤 2013)、ブナハバチ

等の食葉性昆虫による食害 (越地ら 2012、山上ら 2007) および乾燥化にともなう水ストレスの増加が複合的に関与していると考えられている (相原ら 2004、山根ら 2007)。樹木が衰弱し枯死に至る原因として、直接あるいは間接的に水ストレスが関与するとされる (Manion and Lachance 1992)。しかし、水ストレスの増加についての議論は、丹沢山地に生育するブナが実際に強い水ストレスを生じた状態で生育しているかどうかの報告例が少ないことから、推論の域に止まっている (石村ら 2010)。

丹沢山地に生育するブナの水分状態に関する報告例が少ない理由の一つとして、植物や土壌の水分保持力を示す数値で水ストレスの指標として最も良く用いられる葉の水ポテンシャルを山岳地帯で測定することの困難さがあると考えられる。葉の水ポテン

* 京都府立大学大学院生命環境科学研究科 (〒 606-8522 京都市左京区下鴨半木町 1-5)

** 現所属 環総テクノス (〒 541-0052 大阪市中央区安土町 1-3-5)

*** 現所属 林野庁九州森林管理局 (〒 860-0081 熊本市西区京町本丁 2-7)

シャルは、季節、時刻、天候により測定値が変化する。そのため、特に天候の変化が激しい山岳地帯では正確な葉の水ポテンシャル値を得るために測定を繰り返し行う必要がある。さらに一般的に行われるプレッシャーチャンバー法 (Scholander *et al.* 1965) による葉の水ポテンシャル測定は、短時間で測定できる利点があるものの、測定装置の重量が重く、運搬の負荷が大きいことも山岳地帯における測定を困難にさせている。そこで、丹沢山地におけるブナ林の衰退原因の解明には、山岳地での測定に適した水ストレス評価手法を確立する必要がある。

その候補として、木部構造の測定が挙げられる。樹木の水ストレスに対する応答には様々な方法がある。一時的かつ急性の水ストレスに対しては、気孔開度の調節 (Tyree and Sperry 1988) や葉細胞の浸透調節および弾性率の変化 (Ladiges 1975、White *et al.* 2000) により対応する。一方、慢性的な水ストレスに対しては、葉面積の減少 (Grier and Running 1977) や木部構造すなわち水分通道組織である道管・仮導管を変化させること (Tyree and Zimmermann 2002、Nardini and Salleo 2005) により対応する。水利用が制限される環境下での樹木の生存の可否は、道管・仮導管の水分通道機能の維持能力に大きく影響される (Davis *et al.* 1999、Hacke *et al.* 2000)。すなわち、慢性的な水不足環境下では、樹木は木部構造を変化させることで水分通道機能消失のリスクを低下させており (Pinto *et al.* 2012)、丹沢山地の衰退地のブナでも同様の反応が生じていると推測される。このことを捉えるための木部構造の測定は実験室内で行えばよく、現地では枝を採取するだけなので過度の負荷がかからず、丹沢の山岳地にも適用できると期待される。

ここでは、慢性的な水ストレス環境下において樹木体内とくに水分通道組織である道管・仮道管で生じる事象を整理し、水ストレスにより樹木が衰弱・枯死に至る流れについて検討したうえで、山岳地に適しており、丹沢山地のように衰退の激しいブナ林でも適用できる樹木の水ストレスの診断手法について提案をおこなった。

II 樹木体内の水の上昇機構 SPAC

樹木体内における水の流れは、凝集力-張力理論 (Tyree 1997) により説明される。樹木は、光合

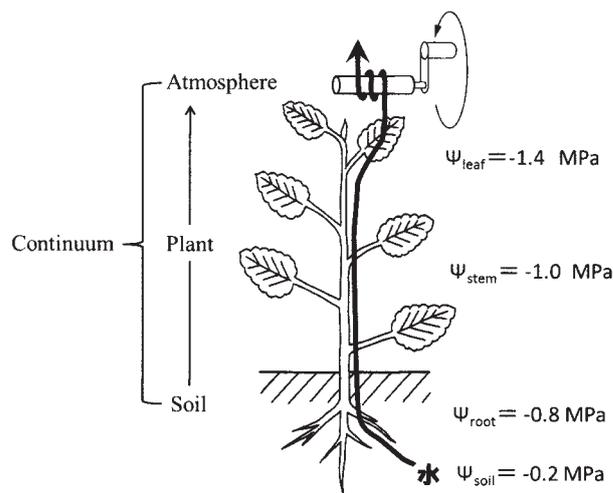


図1 土壌-植物-大気間の水の流れ

水は SPAC と呼ばれる土壌-樹木-大気を連続した系 (Soil - Plant - Atmosphere Continuum) を形成し、樹木体内の水は葉の蒸散表面から根の吸水面まで連続した水柱を形成している (太矢印)。水は、水ポテンシャルの勾配により、大気の乾燥を源動力として葉の蒸散面から引き上げられることで、樹木体内を上昇する。 Ψ_{soil} 、 Ψ_{root} 、 Ψ_{stem} および Ψ_{leaf} は、土壌、根、幹および葉の水ポテンシャルをそれぞれ示す。

成に必要な二酸化炭素を葉の気孔を通して取り入れる。そのとき同時に気孔から水が蒸発する現象を蒸散という。蒸散に必要な水は、土壌から根を通して吸収され、幹の内部を通り、葉に供給される。つまり、水は SPAC と呼ばれる土壌-樹木-大気の間を連続した系 (Soil - Plant - Atmosphere Continuum) を移動し、葉の蒸散面から根の吸水面まで連続した水柱を形成している (図1)。

蒸散は葉の気孔が開き、大気の乾燥が原動力となって葉の中の水が大気中に引き出されることで生じる。水の移動は、水ポテンシャルの勾配にしたがい、水ポテンシャルが高い方から低い方へ生じる。葉から蒸散が始まると、葉の水ポテンシャルが低下し水を吸い上げる力が増加する。その結果、葉とそれ以下の部位との間に水ポテンシャルの差が生じることで、水分通道組織である道管あるいは仮道管内の水柱に上向きの張力 (通常、数 MPa 程度) が働き、水が上昇する。この現象が次々と下部へ伝わることで樹木体内を水が上昇し、最終的に水は土壌から樹木の先端まで引き上げられる (Tyree 1997)。そのため樹木が生育するには、土壌-植物-大気間で水循環すること、つまり水柱が連続していることが極

めて重要となる。連続が断たれると水循環が成立せず、最悪の場合には樹木は衰弱し枯死にいたる。水柱は、道管・仮道管という極めて細い管内に存在するため、水の凝集力（水分子間に働く引力）が強く働くことにより 30MPa 程度の張力が生じても連続性は維持され、通常では断ち切られることはない。しかし、水柱が断ち切られる現象は比較的頻繁に起こることが知られている (Hacke *et al.* 2000)。

Ⅲ 水柱が断ち切られる現象 キャビテーション

木部の水分通道組織として、針葉樹では仮導管、広葉樹では主として道管が機能する。仮導管は、長さは 1 mm から数 mm、直径は数 μm ～数十 μm の細長い紡錘形をした細胞からなる。仮導管の両端は、尖って閉じた構造をしており、壁孔と呼ばれる仮道管同士の水の連絡通路が存在する。一方、道管は、長さは数百 μm ～数千 μm 、直径は数十 μm ～数百 μm の道管要素と呼ばれる筒状の組織が縦につながって形成される。道管要素はそれぞれが短いものの道管は数十 cm 以上になる。道管は、まっすぐに伸びているわけではなく、互いに隣接する道管が接続したり、あるいは捻れたりして存在している。道管要素側面にも壁孔が多数存在する。

道管・仮導管の中には、様々な理由（傷・落葉など）により、内部が気泡で満たされ空洞化し水分通道機能を消失したものが存在する（図 2）。隣接する道管・仮導管が空洞化すると、壁孔に空気と水のメニスカス（界面張力によって細管内の液体の表面がつくる曲面）が形成される。活発な蒸散活動や水不足などにより、水柱に生じる張力が限界以上になると、メニスカスを形成する力学的均衡が崩壊し、気泡が壁孔を通過して隣接する道管・仮導管内へと引き込まれる。この気泡が引き込まれる現象をキャビテーションという（図 2）。葉の水ポテンシャルが低下することによってキャビテーションが頻発し、引き込まれた空気が道管・仮導管内に広がり、空洞が形成され塞栓症（エンボリズム）を生じると水柱が断絶される。木部の水分通導機能は、エンボリズムを生じた道管・仮導管の増加にともない低下し、最悪の場合には完全に失われる。

樹木は木部の水分通導機能が低下すると、枝先枯れ等を生じ成長や生育に影響するため、水分条件に応じてキャビテーションに対する感受性を変化させ

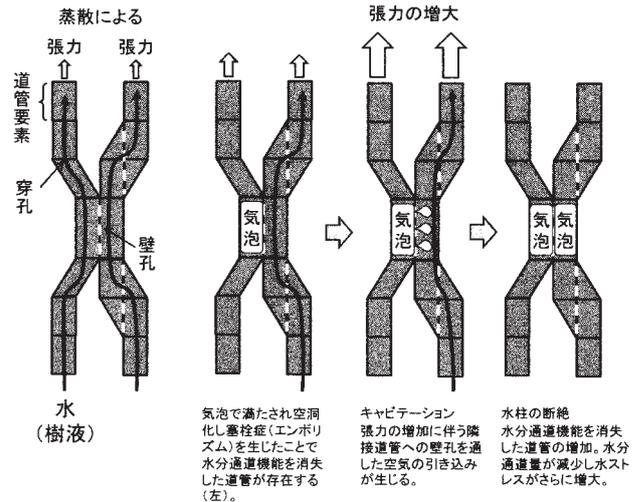


図 2 道管のキャビテーション発生と水分通道機能消失の模式図

ることがある (Pinto *et al.* 2012)。キャビテーション感受性は、樹種や生育環境により異なり (Tyree and Ewers 1991, Davis *et al.* 1999, Hacke *et al.* 2000)、樹木の耐乾性を評価する最も重要なパラメーターとされる (Tyree and Ewers 1991)。

Ⅳ キャビテーション感受性の評価

キャビテーション感受性は、道管・仮道管の水柱に生じる張力（木部圧ポテンシャル）と、木部の水分通道機能の消失率との関係を示すキャビテーション感受性曲線（vulnerability curve）で評価する。キャビテーション感受性曲線を作成する方法として遠心分離法 (Alder *et al.* 1997) と空気注入法 (Cochard *et al.* 1992) がある。遠心分離法と空気注入法との違いは、道管・仮道管の生じさせるキャビテーションの発生方法の相異にある。広葉樹においては、道管の長さが針葉樹の仮道管と比較し長く、長い試料で測定することが可能な空気注入法を用いることが多い。ここでは空気注入法における枝木部の感受性の評価方法について述べる。

空気注入法は、木部に木部圧ポテンシャルに相当する圧力で空気を送り込むことにより、強制的にキャビテーションを生じさせる（図 3）。まず、木部試料をプレッシャースリーブに挿入する。そして、水分通導度を測定するために、試料の根に近い一方の端に、高さ h (m) から KCl 水溶液を流し、もう一方の端から一定時間 t (s) に流出する液量 Q (g) を測定する。そして、プレッシャースリーブに一定

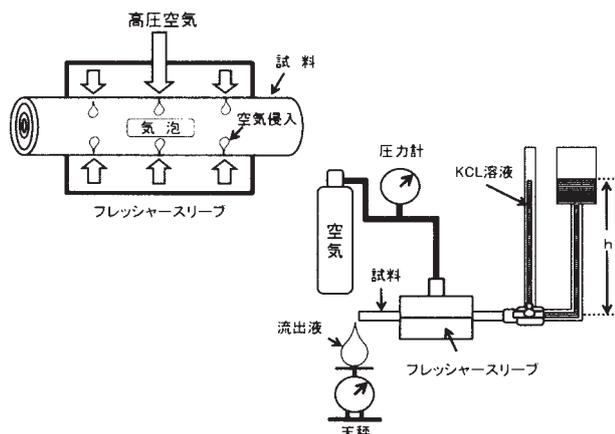


図3 キャビテーション感受性の測定法（空気注入法）模式図

左上図はフレッシュアスリーブ内にセットした試料と高圧空気を負荷することにより道管・仮道管に発生するキャビテーションのイメージ。

時間負荷する圧力を1MPaずつ上げていき、それぞれの圧力で流出する液量 Q (g)を測定する。

水分通導度 kn ($g\ s^{-1}\ MPa^{-1}$)は平均流出量 Q (g)、測定時間 t (s)、水柱高 h (m)から以下のように算出する。

$$kn = Q / (t \times 9.807 \times h)$$

さらに、流出液量の最大値 Q_{init} を用いて水分通導度 k_{max} を算出する。

$$k_{max} = Q_{init} / (t \times 9.807 \times h)$$

また、各試料の単位木部面積当たりの水分通道度(比水分通道度 Ks ($g\ s^{-1}\ MPa^{-1}\ m^{-1}$)は試料の長さ L (m)、試料の断面積 A (m^2)から以下のように算出し、

$$Ks = k_{max} \times L / A$$

試料の水分通道消失率PLC (percent loss conductance : %)を以下で算出する。

$$PLC = (k_{max} - kn/k_{max}) \times 100$$

そして、負荷した圧力(MPa)の負の値(木部圧ポテンシャル(MPa))をX軸、水分通導消失率PLC (%)をY軸にプロットし、ワイブル関数あるいはシグモイド曲線を近似させてキャビテーション感受性曲線を作成する(図4)。

この曲線からキャビテーション感受性の指標となるP50(水分通道消失率50%時の木部圧ポテンシャル)を算出することができる。P50はその樹木が生育する場所の水分環境を反映すると考えられている(Maherali *et al.* 2004)。P50が低いと強い水ストレスが生じてても道管・仮道管にキャビテーションが発生しにくいいため、キャビテーション感受性は低いと評価できる。つまり、P50が低い樹木は水ストレ

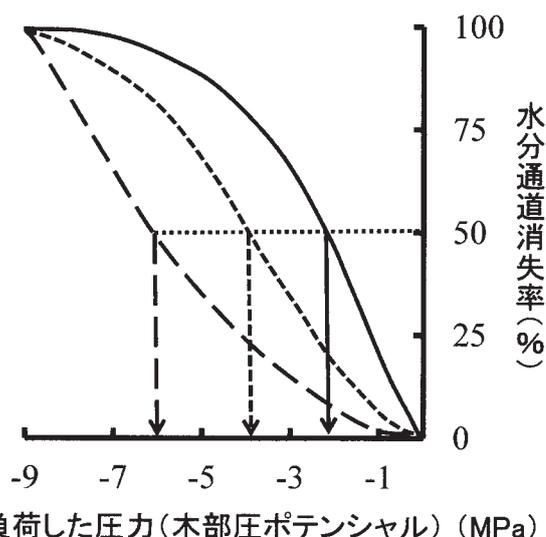


図4 キャビテーション感受性曲線

実線はキャビテーション感受性が高い樹木、長破線はキャビテーション感受性が低い樹木、破線はそれらと中庸の樹木をそれぞれ示す。矢印はそれぞれのP50を示し、キャビテーション感受性が高いほど、P50が高くなることがわかる。

スが強く生じる環境においても木部の水分通導機能が失われにくく、生育し続けられる可能性が高いといえる。

V 水ストレスによるキャビテーション感受性の変化

道管・仮道管の内径が大きいと壁孔が大きい傾向があり、壁孔からの空気流入や水の漏出によるキャビテーションが生じやすくなる(Jansen *et al.* 2009)。そこで、慢性的な水ストレス環境下に生育する樹木は、内径が小さく壁孔も小さい道管・仮道管を数多く作ることで(図5)、キャビテーション感受性を低下させる(Pinto *et al.* 2012, Sperry *et al.* 2008)。そのため、通常では、慢性的に水ストレスが生じる環境下に生育する樹木ほどP50が低い値を示す(Maherali *et al.* 2004)。

一方、慢性的な水ストレス環境下に生育する樹木において、キャビテーション感受性を高くする現象も存在する。キャビテーション疲労(cavitation fatigue) (Hacke *et al.* 2001)と呼ばれる現象で、道管・仮道管にキャビテーションとリフィリング(道管・仮道管に水が再充填される現象)の繰り返しが生じることで、同じ木部圧ポテンシャルであっても水分通道消失率が増加するようになる(Hacke *et al.* 2001)。

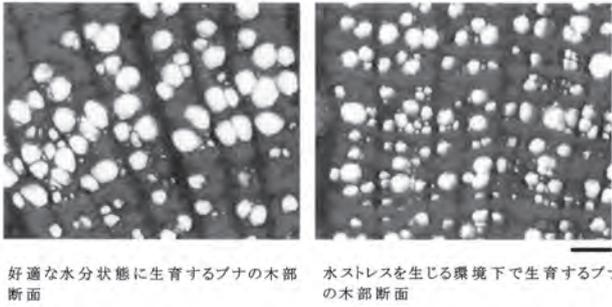


図5 異なる水分環境下に生育するブナ木部の光学顕微鏡写真

水ストレスを生じる環境下で生育しているブナでは道管径が小さく道管密度が高いことがわかる (Ueda et al., unpublished)。バーは 10 μm を示す。

VI 道管内径と水ポテンシャルの関係

キャピテーションの発生を抑制するために道管・仮道管の内径を小さくした樹木は、道管・仮道管の密度を高めることで水分通道域（水分通道域 = 道管・仮道管内径面積合計 / 木部面積 × 100）を確保し、比水分通道度 (Ks) を維持する (Pinto et al. 2012, Sperry et al. 2008)。そのため、慢性的な水ストレス環境下に生育する樹木の道管・仮道管の内径階分布は、小内径の出現頻度が高くなる (図6)。

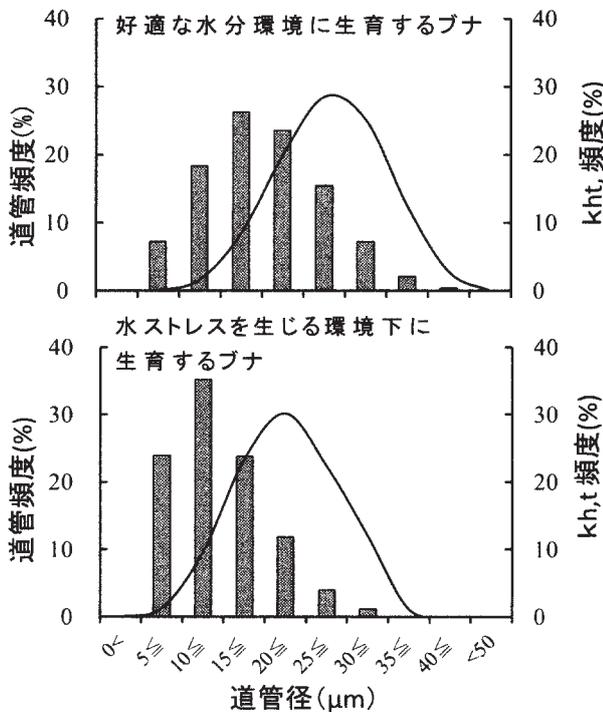


図6 異なる水分環境下に生育するブナ木部の道管径と理論水分通道度 (Kh,t) の頻度分布
棒グラフは各道管径階の出現頻度、実線は各道管径階の理論水分通道度 (Kh,t) の出現頻度をそれぞれ表す (Ueda et al. unpublished)。

道管・仮道管の水分通道能力を示す理論水分通道度 $K_{h,t}$ ($\text{kg s}^{-1} \text{MPa}^{-1}\text{m}$) は、水の密度 ρ 、水の粘弾性 η 、 i 個の道管内径 D_i から以下により算出する。

$$K_{h,t} = (\pi \rho / 128 \eta) \sum D_i^4$$

水分通道度は、Hagen-Poiseuille の法則により道管半径の 4 乗に比例する (Sellin et al. 2008, Sperry et al. 1994, Tyree et al. 1994, Tyree and Zimmerman 2002)。そのため、水分通道域が同じでも、小さい内径の道管・仮道管の割合が高くなることで水分通道度が低下する。そうすると、日中の葉の水ポテンシャルがさらに低下し、樹体全体の水ポテンシャルも低下し、その結果土壌からの吸水力が高まることになる。このように慢性的な水ストレス環境下に生育する樹木は、道管内径を小さくし、土壌からの吸水力を高めることで生存を可能にする (Sperry 2008)。しかし、道管・仮道管の内径を小さくすることで、樹体に生じる水ストレスをさらに増大させることにもなる。

VII 樹木の衰退・枯死への流れ

強い水ストレスが頻繁に生じる環境下に生育する樹木が衰弱・枯死に至るまでの一つの流れとして、道管・仮道管のキャピテーション疲労によるキャピテーション感受性の上昇と内径が小さい道管・仮道管を増加させることによる水ポテンシャルの低下の視点から考える (図7)。慢性的に水ストレスを生じる環境に生育する樹木は、水ポテンシャルの低下によるキャピテーション発生を抑えるために、内径が小さく壁孔が小さい道管・仮道管の割合を増加さ

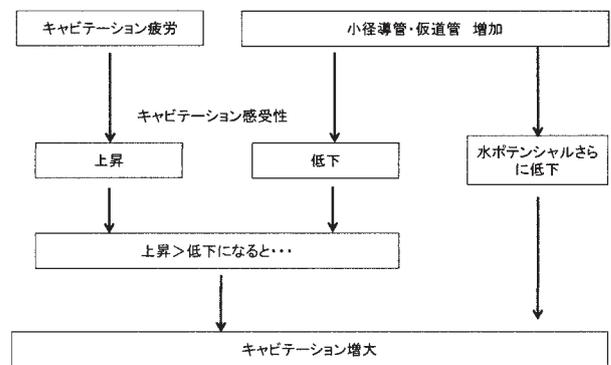


図7 樹木が水ストレスにより衰弱・枯死に至る流れの一例
キャピテーション疲労が強く生じることによりキャピテーション感受性が増大する。太矢印は破線矢印よりも効果が強いことを示す。

せ、キャビテーション感受性を低下させる。しかし、頻繁に強い水ストレスが生じることで、キャビテーション疲労によるキャビテーション感受性の上昇が生じる。このキャビテーション感受性の上昇が低下の程度を上回るとキャビテーションの発生が増加する。内径が小さい道管・仮導管の増加は、樹体の水ポテンシャルを低下させることで土壌からの吸水を有利にするものの、樹体に生じる水ストレスを強くすることにもなり、キャビテーションをさらに増大させる要因となる。このように、強い水ストレスが頻繁に生じる環境下においてキャビテーションが生じやすくなった個体で、水分通導が消失した木部が増えることで枝先枯れや葉の萎凋が生じて葉量が減少し、やがて樹体全体が深刻な水不足状態へと陥り、最終的に枯死に至る。

VIII 山岳地に生育するブナの水ストレス診断

このことから木部のキャビテーション感受性と木部構造を同時に調べ、キャビテーション疲労の発生の有無を明らかにすることで強い水ストレスが樹木に生じているか否かを診断できると考えられる。つまり、内径が小さい道管・仮道管の割合が高く、キャビテーション感受性が低下しているはずが実際には高くなっている樹木は、キャビテーション疲労が生じており慢性的に水ストレスを生じた状態で生育していると判断することができる。このようなキャビテーション感受性測定と木部構造観察の結果は、季節、時刻、天候に大きく左右されることがない。また、現地での作業は枝の採取のみで、重い測定装置の運搬の必要はない。このことは、山岳地域に生育する樹木に生じている水ストレスの有無を診断する手法として、キャビテーション感受性測定と木部構造観察が極めて有効であることを示している。これまでブナ的水分状態の報告例が少なかった丹沢山地において、今後ブナ林の衰退原因を解明し、効果的に再生するうえで有効な水ストレス診断方法となる。

IX 引用文献

相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地 正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (II) 神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象. 大気環境学会誌 39 : 29-39.

- Alder, N.N., Pockman, W.T., Sperry, J.S. and Nuismer, S. (1997) Use of centrifugal force in the study of xylem cavitation. *J. Exp. Bot.* 48 : 665-674.
- Cochard, H., Bre' da, N., Granier, A. and Aussenac, B. (1992) Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Q. pubescens* Wild., *Q. robur* L.). *Ann. For. Sci.* 49 : 225-233.
- Davis, S.D., Sperry, J.S. and Hacke, U.G. (1999) The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freezing. *Am. J. Bot.* 86 : 1367-1372.
- Grier, C.C. and Running, S.W. (1977) Leaf area of mature northwestern coniferous forests : relation to site water balance. *Ecology* 58 : 893-899.
- Hacke, U.G., Sperry, J.S. and Pitterman, J. (2000) Drought experience and cavitation resistance in six shrubs from the Great Basin, Utah. *Basic Appl. Ecol.* 1 : 31-41.
- Hacke, U.G., Stiller, V., Sperry, J.S., Pittermann, J. and McCulloh, K.A. (2001) Cavitation fatigue. Embolism and refilling cycles can weaken the cavitation resistance of xylem. *Plant Physiol.* 125 : 779-786.
- 堀田 庸・森川 靖・峠田 宏・松本陽介・松浦陽次郎・石塚和裕 (1993) 森林衰退 酸性雨は問題になるか. 102pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- 石村彰大・清水 庸・Rahimzadeh, P.・大政賢次 (2010) Water deficit index (WDI) を用いた丹沢山地におけるブナ群落の衰退状況の評価. *Eco-Engineering* 22 : 141-146.
- Jansen, S., Choat, B. and Pletsers, A. (2009) Morphological variation of inter-vessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms. *Am. J. Bot.* 96 : 409-419.
- 越地 正・谷脇 徹・相原敬次・山根正伸 (2012) 檜洞丸におけるブナハバチ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報

- 告 9 : 95-104.
- 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 (I) 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.
- Ladiges, P.Y. (1975) Some aspects of tissue water relations in three populations of *Eucalyptus viminalis* Labill. *New Phytol.* 75 : 53-62.
- 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) 性降水物と生態系影響 丹沢・檜洞丸におけるブナ林の枯損と酸性降水物. 環境科学会誌 12 : 241-250.
- Maherali, H., Pockman, W.T. and Jackson, R.B. (2004) Adaptation variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology* 85 : 2184-2199.
- Manion, P.D. and Lachance, D. (1992) *Forest decline concepts*. 249pp, APS Press, Minnesota.
- 松本陽介・小池信哉・河原崎里子・上村 章・原山尚徳・伊藤江利子・吉永秀一郎・大貫靖浩・志知幸治・奥田史郎・石田 厚・埜田 宏 (2002) 関東平野における樹木衰退の1999年～2001年の状況. 森林立地 44 : 53-62.
- Nardini, A. and Salleo, S. (2005) Water stress-induced modifications of leaf hydraulic architecture in sunflower: coordination with gas exchange. *J. Exp. Bot.* 56 : 3093-3101.
- Pinto, C.A., David, J.S., Cochard, H., Calderia, M.C., Henriques, M.O., Quilho, T., Paco, T.A., Pereira, J.S. and David, T.S. (2012) Drought-induced embolism in current-year shoots of two Mediterranean evergreen oaks, *Forest Ecol. Manag.* 285 : 1-10.
- Sellin, A., Rohejarv, A., and Rahi, M. (2008) Distribution of vessel size, vessel density and xylem conducting efficiency within a crown of silver birch (*Betula Pendula*). *Trees* 22 : 205-216.
- Scholander, P.F., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A., and Hammel, H.T. (1965) Sap Pressure in Vascular Plants. *Science* 16 : 339-346.
- Sperry, J.S., Meinzer, F.C. and McCulloh, K.A. (2008) Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. *Plant Cell Environ.* 31 : 632-645.
- Sperry, J.S., Nichols, K.L., Sullivan, J.E.M. and Eastlack, S.E. (1994) Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous and coniferous tree of northern Utah and interior Alaska. *Ecology* 75 : 1736-1752.
- 清水英幸・伊藤祥子 (2013) ブナ林の衰退 丹沢山地で起きていること ブナに及ぼす複合的な水ストレスの影響. 森林科学 67 : 14-17.
- 鈴木 透・山根正伸 (2013) ブナ林の衰退 丹沢山地で起きていること 空中写真からわかるブナ林の衰退. 森林科学 67 : 6-9.
- Tyree, M.T. (1997) The Cohesion-Tension theory of sap ascent: current controversies. *J. Exp. Bot.* 48 : 1753-1765.
- Tyree, M.T., Davis, S.D. and Cochard, H. (1994) Biophysical perspectives of xylem evolution: Is there a trade-off of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction? *IAWA Journal* 15 : 335-360.
- Tyree, M.T. and Ewers, F.W. (1991) The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytol.* 119 : 345-360.
- Tyree, M.T. and Sperry, J.S. (1988) Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? Answers from a model. *Plant Physiol.* 88 : 574-580.
- Tyree, M.T. and Zimmermann, M.H. (2002) *Xylem structure and the ascent of sap*. 283pp, Springer-Verlag, Berlin.
- White, D.A., Turner, N.C. and Galbraith, J.H. (2000) Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric *Eucalyptus* species planted in Mediterranean southwestern Australia. *Tree Physiol.* 20 : 1157-1165.

山上 明・谷 晋・伴野英雄 (2007) ブナハバチ食害によるブナ枯死とブナ林の衰退. 256-268. 丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.

山根正伸・藤澤示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・斉藤央嗣 (2007) 丹沢山地のブナ林の現状 林分状況と衰退状況. 479-484. 丹沢大山総合調査学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 794pp, (財)平岡環境科学研究所, 神奈川.

ブナの水欠差測定による丹沢山地の水分ストレス評価

相原敬次*・谷脇 徹*・齋藤央嗣*・越地 正*

Evaluation of water stress in Japanese beech (*Fagus crenata*) trees on measurement of leaf water deficit in the Tanzawa Mountains

Keiji AIHARA*, Tooru TANIWAKI*, Hiroshi SAITO*, Masashi KOSHIJI*

要 旨

相原敬次・谷脇 徹・齋藤央嗣・越地 正：ブナの水欠差測定による丹沢山地の水分ストレス評価 神奈川県自環保セ報告 14 : 49-51, 2016 ブナ的水分ストレスを把握する目的で丹沢山地内の7地点においてブナ葉の水欠差測定による測定を実施した。その結果、ブナが健全な地点に比較してブナの衰退や枯損が目立つ地点では相対的に水欠差が高く、ブナ的水分ストレスが大きい傾向が認められた。また、ブナが健全な地点に比較して、ブナの衰退や枯損が目立つ地点では個体間の水欠差のバラツキが大きい傾向が認められた。

I はじめに

丹沢山地に生育するブナの衰退は、大気汚染（オゾン）、水分ストレスおよび虫害（ブナハバチ）が要因として指摘されている（山根ら 2007）。とりわけ、水分ストレスは植物の水収支の不均衡によって成長が低下するとともに、衰退から枯損へ結びつく大きな要因である。丹沢山地のブナの衰退から枯死への機構を明らかにするためには、ブナ個体の水分生理（水分ストレス）を把握し、評価することが不可欠である。

これまでに、丹沢山地内のブナ的水分ストレスに関連する調査がいくつかおこなわれてきている。例えば、衰退の進んだ個体では夜間に過剰な蒸散による水収支の不均衡が認められること（相原ら 2012）や、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（上田ら 2016）などがある。

今回、丹沢山地に生育するブナ的水分ストレスの実態を把握する目的で水欠差測定を実施した。水欠差は、相対含水率や葉内水分不足度とも呼ばれ、葉が水分を十分に含有可能な状態からどの程度不足

（欠差）しているかを簡易に把握するための指標で古くから用いられており、値が大きいほど水分ストレスが大きい評価となる（田崎 1987、Maruyama *et al* 1987）。この方法は、水ポテンシャル計測や蒸散、樹液流の計測方法に比較して簡易であるため、同時に多くの個体の水ストレスを相対的に評価できる利点をもっている。この利点を生かし、丹沢山地内で広域的に測定を実施した。

II 方 法

1 測定地点および測定日

測定は2012年および2014年の夏季に実施した。2012年が三国山（標高1170m）、菰釣山（標高1379m）、大室山（1587m）、檜洞丸（1601m）、丹沢山（1567m）および堂平（1200m）の6地点を対象に、また2014年が上記6地点のうち大室山に替えて犬越路峠（標高1060m）を対象にてそれぞれ測定した。測定地点の位置を図1に示した。因みに、これらの地点のうち丹沢山、檜洞丸、犬越路峠および大室山の4地点ではブナの衰退や枯損が顕著に認められて

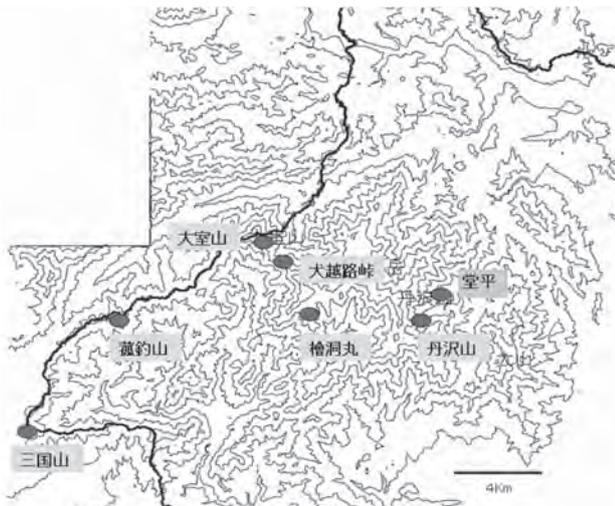


図1 水欠差測定地点

いる。測定日は、2012年の7月24日（1回目）と同年9月4日（2回目）、2014年の7月23日（3回目）、同年8月20日（4回目）の4回実施した。なお、測定に際しては、天候が晴れ、午前11時から午後2時までの時間帯にブナ葉を試料として採取した。

2 水欠差の測定方法

水欠差の測定は田崎（1978）の方法に準じ、以下の手順で実施した。

- 各測定地点でブナ5個体を無作為に選定するとともに以後の測定の対象個体とする。
- 個体ごとに約50～60枚程度の陰葉を小枝に着葉のまま2～3ヶ所から測定用試料として採取する。
- 採取した試料はパッチ付きのビニール袋に入

れ、袋中の空気を押し出した後、保冷剤を入れたクーラーボックスに入れて実験室に持ち帰る。

- 測定用試料は個体毎に5g程度になる葉を葉柄ごと取り外した葉試料とし、速やかに0.01g単位まで秤量し、生重（Fw）とする。
- 生重秤量後の葉試料は、水を含ませた脱脂綿あるいはキムワイプで葉柄を包んだ後、パッチ付きビニール袋に入れ、葉柄部分が浸たる程度の水を加え、暗所で6時間以上放置し、葉柄から飽水する。
- 放置後の飽水した葉試料をビニール袋より取り出し、葉面や葉柄についた余分な水滴をキムワイプ等で取り除いて秤量、飽水重（Fws）とする。
- 飽水重秤量後の葉試料は、80℃から85℃で48時間乾燥後の乾燥重（Dw）を求める。
- 下式によりそれぞれのブナ個体の水欠差を算出する。

$$\text{水欠差 (\%)} = 100 - \text{相対含水率} * 100$$

$$\text{なお、相対含水率} = (Fw - Dw) / (Fws - Dw)$$

III 結果および考察

各地点の水欠差の測定結果を表1に示した。その結果、1回目と2回目は堂平が1.8%と1.0%と最も低く、次いで三国山の4.3%と4.5%、菰釣山の4.8%と5.7%、丹沢山の10.4%と6.2%、大室山の10.4%と10.0%、檜洞丸の12.0%と10.1%の順に高かった。

表1 水欠差測定結果（単位%）

測定地点	測定日				年度平均	
	2012年7月24日	2012年9月4日	2014年7月23日	2014年8月20日	2012年	2014年
三国山	4.3 ± 1.0 ab	4.5 ± 2.5 ab	3.5 ± 1.1 ab	3.6 ± 1.2 a	4.4 ± 1.0 ab	3.6 ± 1.0 a
菰釣山	4.8 ± 2.6 ab	5.7 ± 2.5 abc	4.0 ± 1.2 ab	4.5 ± 2.3 abc	5.2 ± 1.4 ab	4.3 ± 2.8 a
大室山	10.4 ± 7.2 bc	10.0 ± 3.0 c			10.2 ± 2.7 c	
大越路峠			7.3 ± 3.1 c	9.8 ± 6.1 c		8.5 ± 0.8 b
檜洞丸	12.0 ± 5.3 c	10.1 ± 3.6 bc	4.3 ± 2.1 ab	7.6 ± 4.7 abc	11.1 ± 3.1 c	6.0 ± 2.3 ab
丹沢山	10.4 ± 3.8 bc	6.2 ± 4.2 abc	4.9 ± 1.5 abc	7.1 ± 2.9 abc	8.3 ± 2.7 bc	6.0 ± 1.5 ab
堂平	1.8 ± 1.8 a	1.0 ± 0.1 a	2.6 ± 0.8 a	4.0 ± 1.4 ab	1.4 ± 0.7 a	3.3 ± 0.6 a

値の±は平均値の95%信頼限界値を示す。
値に付した同じアルファベットは多重比較(Tukey HSD (0.05)で平均値に差が無いことを示す

2014年の3回目は、堂平が2.6%と前2回同様に最も低いものの、7.3%の犬越路峠を除いた他の地点、とりわけ檜洞丸が4.3%、丹沢山が4.9%であり、前2回に比較して低かった。4回目は三国山が3.6%と最も低く、次いで堂平の4.0%と菰釣山の4.5%が低く、丹沢山の7.1%、檜洞丸の7.6%および犬越路峠の9.8%が高かった。このように、ブナが健全な三国山や菰釣山、堂平に比較してブナの衰退や枯損が顕著な大室山や犬越路峠、檜洞丸、丹沢山では相対的に水欠差が高くブナの水分ストレスが大きい傾向が認められた。各地点の水欠差について年度別の平均値と信頼幅を比較した。その結果、2014年度は2012年に比較して地点間の差が顕著に認められなかったが、いずれも三国山や菰釣山、堂平などブナが健全な地点に比較して、大室山や犬越路峠、檜洞丸、丹沢山などブナの衰退が目立つ地点では平均値の95%信頼限界値の幅が大きく、個体間のバラツキが大きい傾向が認められた。このことは、ブナが健全な地点ではいずれの個体も水分ストレスが小さいため、個体差も小さいが、ブナの衰退地点では個体ごとの水分ストレスの大小の差が大きくなることを示している。今回の測定では地点ごとに5個体のブナを対象に測定したが、対象個体数と測定頻度等、測定方法については今後の検討すべき課題であると考えられる。

IV まとめ

ブナの水分ストレスを把握する目的で丹沢山地の主な地点で2012年と2014年の夏季にそれぞれ2回、合計4回の水欠差測定を実施した。その結果、ブナ

が健全な三国山や菰釣山、堂平に比較してブナの衰退や枯損が顕著な大室山や犬越路峠、檜洞丸、丹沢山では相対的に水欠差が高くブナの水分ストレスも大きいことがわかった。

また、三国山や菰釣山、堂平などブナが健全な地点に比較して大室山や犬越路峠、檜洞丸、丹沢山などブナの衰退が目立つ地点では平均値の95%信頼限界値の幅が大きく、個体間のバラツキが大きい傾向が認められた。

V 引用文献

- 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 (2012) 丹沢山地におけるブナの樹液流速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
- 上田正文・城向光弥・水野沙保里 (2016) 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, 神奈川県自然環境保全センター報告
- 田崎忠良 (1987) 環境植物学, pp125, 朝倉書店、東京
- Maruyama K and Toyama Y (1987) Effect of Stress on Photosynthesis and Transpiration in Three Tall Deciduous Trees. J. Jpn. For. Soc. 69:165-170
- 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, 703-710, 神奈川県

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

相原敬次*・谷脇 徹*・齋藤央嗣*・越地 正*・
谷 晋**・伴野英雄***・山上 明**

Forecasting beech sawfly (*Fagineura crenativora*) larval feeding damage based on weather factors in the Tanzawa Mountains

Keiji AIHARA *, Tooru TANIWAKI*, Hiroshi SAITO*, Masashi KOSHIJI*,
Susumu TANI**, Hideo BANNO**, Aikra YAMAGAMI**

要 旨

相原敬次・谷脇 徹・齋藤央嗣・越地 正・谷 晋・伴野英雄・山上 明：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 神奈川県自環保セ報告 14 : 53-57, 2016

丹沢山地におけるブナハバチ幼虫による食葉害は発生時期までの気象要因が少なからず関わってくるものと考え、過去1997年から2011年まで15年間の食葉害発生記録をもとに発生予測を目的とした気象要因との関係について検討した。その結果、食葉害の程度は発生前年の12月および発生年の3月の降水量と単相関関係が認められた。また、食葉害の程度を従属変数、気象要因を説明変数とした変数選択による重回帰関係を検討した結果、発生前年9月の平均気温および12月の降水量と発生年3月の日照時間および5月の平均気温が選択され、これら4個の気象要因でブナハバチによる食葉害の程度をほぼ予測できることがわかった。

I まえがき

丹沢山地におけるブナ衰退枯死要因のひとつとしてブナハバチ幼虫による食葉害がある。この地域では1993年に食葉害を確認して以来、その後もしばしばブナハバチが大発生し被害を繰り返している。繰り返し食葉害を受けたブナは急速に衰退が進行する個体があることが確認されている(越地2002)。

食葉害の対策として、衝突板トラップによる羽化成虫の捕獲や粘着シートを用いた幼虫捕獲、薬剤の樹幹注入による殺虫などの手法開発が試みられている(谷脇ら2012、2013、2015)。食葉害の大発生には周期性は確認されず、幼虫が孵化する6月上旬頃

突発的に生じる傾向があり、対策を効果的に実行するためには発生の事前予測、いわゆる発生予察が欠かせないものとなる。このため、土中にある繭の密度モニタリングの結果では、大規模な食葉害の発生地では高密度で推移することが判明している(谷脇ら2012)。また繭密度は大発生のリスク評価指標とはなり得るものの、年変動の検出には適していないことがわかっている。さらに、産卵期にあたるブナ若葉展葉期の雌成虫捕獲数による食害発生前の2～3週間前の予察も試みられているが、より早期の事前予測手法の開発が求められている。

食葉害の大発生は降水量などの気象条件が大きく関わっていることが一般的に知られている(鎌

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

** 東海大学現代教養センター (〒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 東京都町田市常盤町 3758)

田 2006)。気象要因とブナハバチの大発生との関係は明らかではないが、過去1997年と1998年には神奈川県の丹沢山地と東京都の三頭山（桃澤ら1999）で食葉害の大発生が広域的に同調していることから、食葉害の発生は気象要因と関係している可能性があると考えられる。そこで、ブナハバチ幼虫による食葉害の記録と気象要因から食葉害発生の予測の手法について検討した。

II 材料と方法

1 材料

(1) 食葉害の記録

これまでに谷ら（2012）と越地（2012）によって経年的に食葉害の発生が記録されている。前者は1997年から2011年までの15年間の丹沢山域内、5カ所から10カ所における広域的な食葉害の発生記録であり、また後者はブナ衰退や食葉害の発生とも顕著な檜洞丸および丹沢山周辺における1993年から2011年まで19年間の記録である。今回の発生予測の検討には山域内を対象にしたため前者の記録を主に用いたが、後者についても併せて用いた。

(2) 気象要因

丹沢地域および周辺の気象観測は、檜洞丸、丹沢山、鍋割山および菰釣山とアメダスの丹沢湖（雨量のみ）、海老名、山中湖がある。今回の気象要因からの発生予測の検討に際しては丹沢山域内の檜洞丸等の地点の気象要因を用いるのが妥当であるものの、山域内のいずれの地点とも観測経過年が短く1997年以降のデータが存在せず、山頂等の厳しい観測環境のためデータの空白期間が極めて多い。山根ら（2007）によれば、丹沢山域の気象はアメダスの山中湖の観測結果との相関が高いとされている。このことから今回の発生予測の検討には経年的にも観測記録の充実しているアメダス山中湖の観測結果を使用することとし、気象要因としては1992年以降の月平均気温、月間降水量および月間日照時間を用いた。

2 方法

1997年から2011年まで継続して記録されている堂平、丹沢山、檜洞丸、熊笹ノ峰および大室山の5

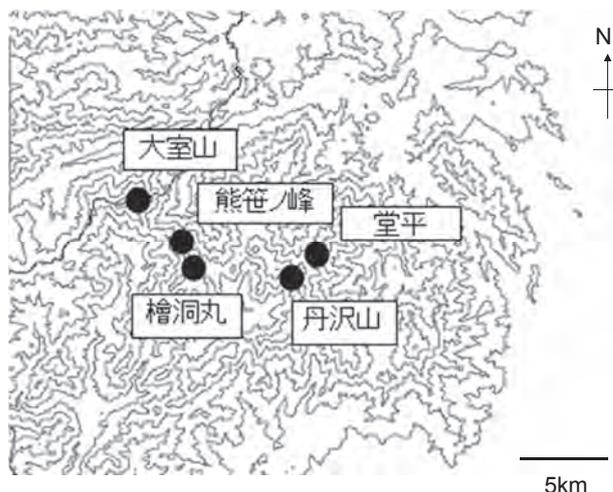


図1 食葉害の調査地

表1 食害指数（谷ら2012a）および食害度

年度	食害指数					食害度（食害指数の平均）
	堂平	丹沢山	熊笹ノ峰	檜洞丸	大室山	
1997年	1.54	2.45	1.56	1.79	1.32	1.73
1998年	1.54	1.94	1.81	2.11	1.08	1.70
1999年	1.45	1.21	1.01	1.08	1.00	1.15
2000年	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2001年	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	1.06
2002年	1.00	1.29	1.15	1.47	1.00	1.18
2003年	1.00	1.19	1.09	1.16	1.00	1.09
2004年	1.05	1.20	1.38	1.60	1.28	1.30
2005年	1.00	1.41	1.15	1.38	1.66	1.32
2006年	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2007年	1.19	1.74	2.19	2.36	2.64	2.02
2008年	1.19	1.02	1.00	1.00	1.00	1.04
2009年	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2010年	1.00	1.01	1.05	1.10	1.22	1.08
2011年	1.00	1.65	2.24	2.29	2.38	1.89

カ所の調査地の食葉害の程度（食害指数）について年度の平均値を食害度とした。なお、食害指数は、食葉害を受けていない地点が1.0、全て食葉害を受けている地点が3.0とし、この間を食葉害の程度より、1.5、2.0、2.5の全体で5段階の評価をした数値である。5カ所の位置を図1に、各地点の食害指数と年度の食害度を表1にまとめた。

ブナハバチは4月下旬から6月上旬にかけて羽化し、展開途中のブナ若葉に産卵する。卵から孵化した幼虫は葉を食して成長し、6月中旬から下旬にかけて摂食を完了するとともに終齢幼虫は地面に落下して土の中で繭を形成して前蛹となる（Shinohara *et al.* 2000）。このため、前年の6月から成虫の羽化する5月までの年間の気象要因が食葉害の発生に関係することを前提として検討した。方法は、食害度について各月の気象要因との関係について検討すると

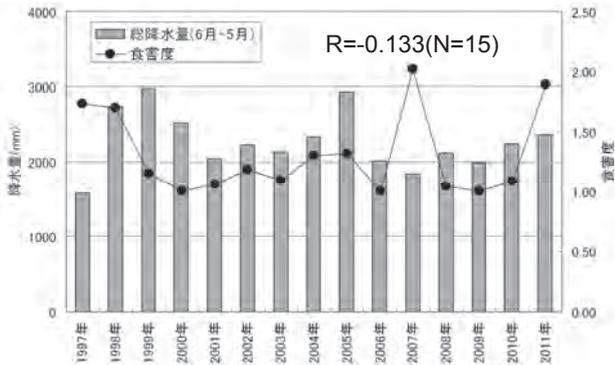


図2 食害度と総降水量の年度推移および相関係数 (R)

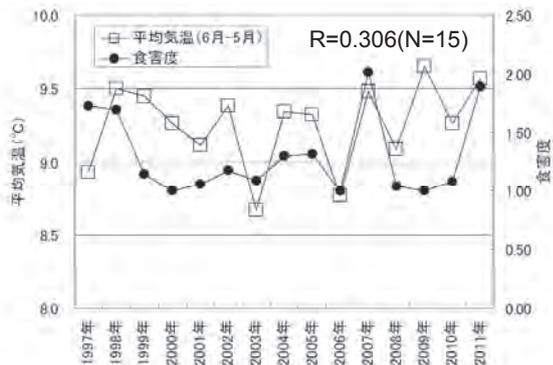


図3 食害度と平均気温の年度推移および相関係数 (R)

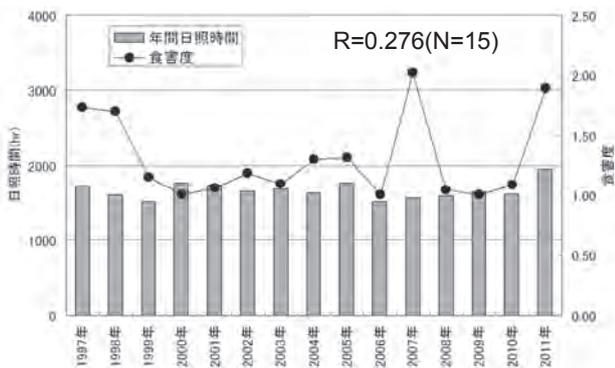


図4 食害度と日照時間との年度推移および相関係数 (R)

ともに、食害度を従属変数、各月の降水量、日照時間および平均気温を説明変数として得られる重回帰モデル式 (モデル式) について検討した。なお、モデル式については SPSS の統計ソフトを用い、線形重回帰式により変数選択 (F 値が 0.05 で選択、0.10 で棄却) で実施した。

III 検討結果および考察

1 食害度と気象要因の年度推移

図 2 から図 4 に年間の総降水量、平均気温および日照時間と食害度の年度推移を示した。1997 年、1998 年、2007 年および 2011 年はブナハバチの幼虫

表 2 食害度と月間降水量、月平均気温および月間日照時間との単相関係数

月	月間降水量	平均気温	月間日照時間
6月	0.020	0.333	0.044
7月	-0.045	0.092	0.054
8月	-0.454	0.087	0.065
9月	-0.075	-0.244	0.154
10月	-0.008	-0.199	0.181
11月	0.240	0.239	-0.162
12月	0.628 *	0.455	0.032
1月	-0.230	-0.184	0.259
2月	0.197	0.374	0.179
3月	-0.576 *	-0.120	0.386
4月	-0.138	0.040	-0.117
5月	0.234	0.201	0.102

* : 単相関係数は5%の危険率で有意 (N=15)

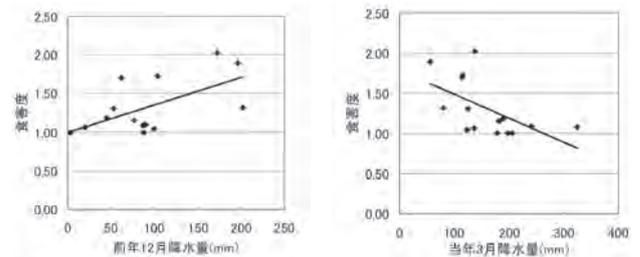


図 5 月間の降水量と食害度との関係

表 3 食害度を従属変数、気象要因を説明変数にした重回帰モデル式

	12月降水量	5月平均気温	3月日照時間	9月平均気温	定数	修正R ²
モデル式1	0.004 (0.628)				0.998	0.348
モデル式2	0.005 (0.835)	0.216 (0.528)			-1.870	0.569
モデル式3	0.005 (0.832)	0.202 (0.490)	0.005 (0.362)		-2.520	0.696
モデル式4	0.005 (0.834)	0.190 (0.461)	0.006 (0.399)	-0.089 (-0.266)	-1.029	0.777

回帰係数の () 内は標準化係数。

が大発生し、いずれも食害度が 1.50 以上と高かった。しかし、これらの年には年間の総降水量、平均気温および日照時間に顕著な傾向は認められなかった。

2 食害度と各月の気象要因との単相関係

食害度と各月の気象要因の単相関係数を求めた結果、表 2 に示したように、12 月の降水量が正の関係、また 3 月の降水量が負の関係で、それぞれ有意となった。このことから、図 5 に示すように前年 12 月の降水量が多いほど食害度が大きく、当年 3 月の降水量が少ないほど食害度が大きくなる傾向があった。

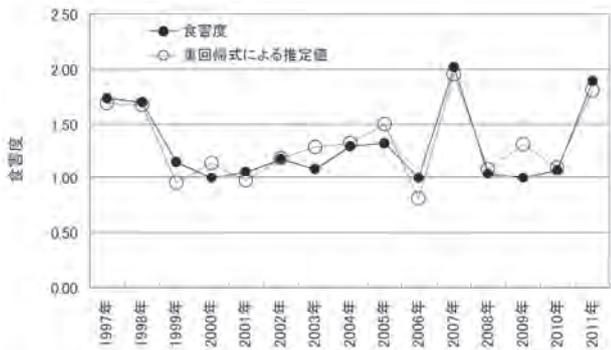


図6 食害度の経年推移と重回帰式による推定値

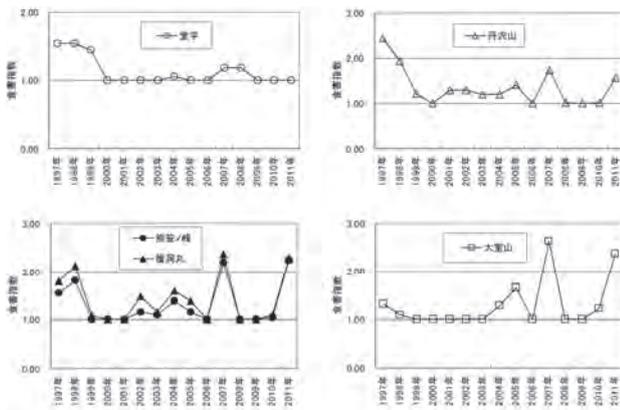


図7 調査地毎の食害指数の年度推移

3 食害度と気象要因との重回帰関係

食害度を従属変数とし各気象要因を説明変数として与え、変数選択による重回帰関係によるモデル式を求めた。その結果、表3に示すようにモデル式1からモデル式4の4モデル式が得られた。このうち、12月の降水量、5月の平均気温、3月の日照時間および9月の平均気温を選択したモデル式4は補正R²値が最も高く、食害度を最も良く反映した(図6)。なお、モデル式4の12月降水量の標準化係数値は0.834と推定値への寄与が高く、単相関係数も高かったことから食葉害の発生になんらかの関係をもつものと考えられた。

4 調査地毎の食害指数と気象要因の重回帰関係

表1の調査地毎の食害指数の年度推移をみると図7に示したように、年度によって若干の違いや特徴が認められる。すなわち、過去に大きく近年は小さくなってきている堂平や丹沢山に比較して大室山では逆の傾向がある。また、檜洞丸や熊笹ノ峰では過去から近年まで同程度の発生で推移している。このため、調査地毎に食害指数と気象要因の重回帰関係の検討を試みた。その結果、表4に示すように、堂

表4 調査地毎の食害指数による重回帰式

調査地	12月降水量	5月平均気温	3月日照時間	9月平均気温	2月平均気温	3月降水量	1月降水量	定数	補正R ²
堂平	重回帰式が得られず								
丹沢山	-0.276 (-0.753)				-0.005 (-0.721)		8.485	0.741	
檜洞丸	0.006 (0.795)	0.325 (0.557)	0.008 (0.379)			-4.649	0.700		
熊笹ノ峰	0.006 (0.810)	0.279 (0.545)	0.007 (0.393)			-4.012	0.725		
大室山	0.005 (0.400)	0.011 (0.465)	0.143 (0.380)	-0.002 (-0.321)		-0.558	0.856		

留係数()内は標準化係数

表5 檜洞丸および丹沢山の食葉害観察結果(越地2002)と食害度の推定値

	食葉害観察結果		食害度の推定値	
	檜洞丸周辺	丹沢山周辺	檜洞丸	丹沢山
1993年	○	○	1.41	1.81
1994年	○	△	1.22	1.33
1995年	△	△	0.67	0.59
1996年	△	△	0.41	0.93
1997年	○	○	1.64	1.77
1998年	○	○	1.96	1.33
1999年	○	○	1.02	0.61
2000年	△	△	1.46	0.26
2001年	△	△	0.97	1.03
2002年	○	△	1.10	1.07
2003年	○	△	1.18	0.86
2004年	○	△	1.56	1.03
2005年	○	○	1.63	1.06
2006年	△	△	0.82	0.57
2007年	◎	○	2.16	1.21
2008年	△	△	1.21	0.74
2009年	△	△	1.46	0.85
2010年	△	△	0.98	0.34
2011年	◎	○	2.18	1.04

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

◻:中規模発生以上、食害度の推定値1.20以上

平ではモデル式が選択されなかったが、他の4地点ではそれぞれのモデル式を求められた。選択された変数は、丹沢山は9月の平均気温と3月の降水量、檜洞丸と熊笹ノ峰は12月の降水量、5月の平均気温および3月の日照時間、また大室山は12月の降水量、3月の日照時間、2月の平均気温および1月の降水量であった。このように調査地毎のモデル式が選択された要因のひとつとして、調査地ごとの食葉害発生のポテンシャル、例えば土中のブナハバチ繭密度など年度による変化が考えられる。このため、モデル式が選択されなかったり、山域全体を対象としたモデル式4とは異なった気象要因を変数として選択している可能性がある。しかし、調査地や地域ごとの食葉害発生の推定や予測は、より効果的な対策からも不可欠である。食葉害の大発生は雌成虫の一斉羽化とブナ展葉のタイミングが食葉害の程度を

左右しており（山上ら 2007、谷ら 2008）、山地の気象や環境が昆虫（ブナハバチ）の発生や植物（ブナ）の成育に具体的にどのような関係を持って影響を及ぼしているかについては、予測精度の向上とともに残された今後の課題である。

なお、この地域でブナハバチによる食葉害が初めて観察された 1993 年以降の丹沢山および檜洞丸周辺の観察記録（越地 2002）と両調査地のモデル式による食害度の推定値とを比較した。その結果、表 5 のように食害度の推定値は 1997 年以前の食葉害の観察結果や以降の丹沢山および檜洞丸の違いもよく反映していることが確認された。

IV まとめ

丹沢山城におけるブナハバチの大発生と展葉のタイミングによる食葉害発生は、発生時期までの気象要因が少なからず関わってくるものと考え、食害発生と気象要因との関係について検討を試みた結果、以下のことがわかった。

- ① 年度でみた食害度と年間の降水量や気温、日照時間の気象要因との関係は認められなかったが、月間との関係では 12 月および 3 月の降水量が食害度と関係が高いことがわかった。
- ② 食害度を従属変数に、気象要因を説明変数とした変数選択による重回帰関係を検討した結果、9 月の平均気温および 12 月の降水量と発生年 3 月の日照時間および 5 月の平均気温が選択され、これら 4 個の気象要因から求めた食害度の推定値と食葉害の発生記録との関係が高かった。
- ③ 食葉害は調査地毎に気象要因の関わり方に違いのあることが認められ、食葉害発生のポテンシャルの経年的な変化によるものと推察された。

V 引用文献

鎌田直人（2006）ブナの葉食性昆虫ブナアオシャチホコの密度変動、日本生態学会誌 56：106-119
 越地 正（2002）丹沢山地におけるブナハバチ大発生の経過とブナの被害実態、神奈川県自然環境

保全センター研究報告 29:27-34

越地 正・谷脇 徹・相原敬次・山根正伸（2012）檜洞丸におけるブナハバチ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報告 9:954

谷 晋・伴野英雄・山上 明（2008）丹沢山地におけるブナハバチ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

谷 晋・伴野英雄・山上 明（2012）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 9:91-104

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（2013）衝突板トラップの色によるブナハバチ成虫の誘引効果の差異、昆虫(ニューシリーズ) 16：159-165

谷脇 徹・猪野正明・鶴田英人・斎藤央嗣・相原敬次・岡田充弘（2015）ブナ若木へのジノテフラン樹幹注入によるブナハバチの防除効果、樹木医学研究 19：139-148

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、日林関東支論 50:221-222

Shinohara A, Vikberg V, Zinovjev A, Yamagami A. (2000) *Fagineura crenativora*, a new genus and species of sawfly (Hymenoptera, Tenthredinidae, Nematinae) injurious to beech trees in Japan. *Bulletin of National Science Museum, Tokyo, Series A*, 26:113-124

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，神奈川県，pp. 256-268

山根正伸・藤沢示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・中島伸行・斎藤央嗣（2007）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）。財団法人平岡環境科学研究所，神奈川県，pp. 375-382

