

カシノナガキクイムシ用集合フェロモン剤とそれを利用した防除法

(独)森林総合研究所 ^{まき} 牧 ^の 野 ^{しゅん} 俊 ^{いち} 一

は じ め に

I ナラ枯れの特徴

ミズナラやコナラを始めとしたナラ・カシ類が急速に枯れてゆくナラ枯れは、現在の日本の森林において最も重要な生物害の一つと言ってよい。多くの樹木が短期間で枯損すること、被害が急速に北上、拡大していることなどから「第二の松くい虫（マツ材線虫病）」とも称されるほどになっている。この病害は本誌でも昨年取り上げられており（黒田，2011），森林保護だけでなく広く植物防疫上の大きな問題として認識されていることがうかがわれる。

ナラ枯れに罹患した樹木は根からの水分移動が阻害され、それによる水切れが原因となり短期間のうちに葉が赤褐色に変化するので、あたかも紅葉したかのように見える。こうした「真夏の紅葉」は遠くからもよく目立つため、一般市民やマスコミ等からの問い合わせも多く、対応に苦慮している自治体も少なくない。

こうした深刻な現状を背景に、研究者はもとより、行政機関、市民ボランティア等も巻き込んで、様々な防除法、対処法の模索が続いているが、決定的な技術、いわば「特効薬」はまだ得られていない。後述するように、外来種がもたらしたマツ材線虫病と異なり、在来生物によると思われるナラ枯れ被害の拡大の背景には、森林の使い方の変化があると指摘されており、特効薬的な対策を期待するのは容易ではない。

こうした状況では、むしろ様々な防除技術を開発し、その場その場の条件（樹種、被害率、投入可能な予算、森林の利用形態等）に合わせて使い分けていくことであろう。本稿ではそうした防除技術の一つとして、森林総合研究所、公立林業研究機関、および薬剤メーカーの共同研究で開発された、ナラ枯れをもたらす病原菌の運搬者（ベクター）である甲虫、すなわちカシノナガキクイムシの集合フェロモンと、それを利用した防除技術について述べることにする。

1 被害の現状

最初にナラ枯れの特徴について述べるが、ここではいくつもの総説（伊藤，2002；衣浦，2002；小林・上田，2005；黒田，2008）をもとに、防除技術を理解するうえでの参考として、概略を記すに止める。

北米由来の外来種マツノザイセンチュウ（*Bursaphelenchus xylophilus*）が病原体であるマツ材線虫病とは異なり、ナラ枯れの場合は病原菌もカシノナガキクイムシも、現在のところ外来種と断定できる証拠はなく、被害も古くから生じていたと思われる。記録に残る最初のナラ枯れは1934年に南九州で生じた被害だが、山形県では少なくとも1900年代初めにはすでに被害が生じていたらしい。

しかしながら、被害が日本海側を中心に急速に拡大したのは1990年代前後である。それ以降、被害地と被害量はほぼ拡大の一途をたどり、林野庁（2011）の統計によれば2010年には30都府県で発生、被害量33万m³に達した。翌2011年には被害量がほぼ半減したものの、依然として深刻な森林被害であることに変わりはない。現在では、北海道、四国、九州北部、沖縄等をのぞき、ほぼ日本全土で被害が生じている。

在来種であるはずの生物が近年になって大きな被害をもたらすようになった理由は完全には明らかになっていないが、かつては薪炭の原料として比較的若いうちに伐採されていたナラ・カシ類が、燃料革命によって放置され、全国的に大径化への道を歩んでいることが、細い木よりも太い木を好んで穿孔するカシノナガキクイムシにとって繁殖に都合のよい環境を作り出しているという説が有力視されている（小林・上田，2005；黒田ら，2008）。

カシノナガキクイムシ（図-1）が穿孔する被害樹種は45種以上が報告されているが、枯死するのはブナ科コナラ属（*Quercus*）のうち、ミズナラ、コナラ等落葉ナラ類が主であり、特にミズナラは枯死しやすい。しかし九州地方など、西南日本では、マテバシイ、アカガシ、スダジイ、ウバメガシ等常緑ブナ科でも枯死例がある。こうしたことから「ナラ枯れ」という一般名称は、わか

Aggregation Pheromone of *Platypus quercivorus*, the Vector Beetle of Japanese Oak Wilt Disease, and Its Use in a New Control Method of the Insect. By Shun'ichi MAKINO

（キーワード：ナラ枯れ，萎凋病，トラップ，ケルキボロール，おとり木）

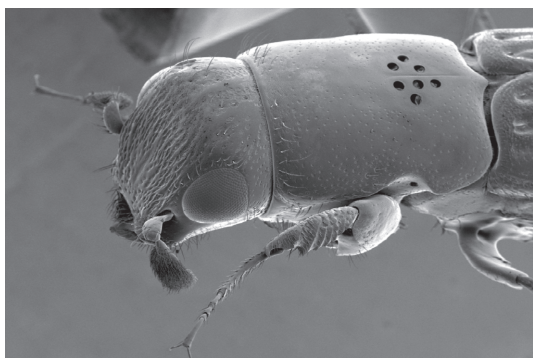


図-1 カシノナガキクイムシ（メス）の頭部と胸部
胸部上面の7個の孔は共生菌を蓄える「菌のう（mycangia）」の入口。（森林総合研究所（2011）より）。

りやすい反面、誤解を招く恐れがある。そのため「ブナ科樹木萎凋病」「ナラ・カシ類萎凋病」等の病名が提唱されている（黒田，2011）。

2 生活史と枯損メカニズム

ナラ枯れをもたらす病原体は、糸状菌の *Raffaelea quercivora*（「ナラ菌」と通称されることが多い）であり、2002年に新種として記載された種である。同じ属からはほかに10種ほどが知られ、多くがキクイムシ類と関係を持つが、樹木を枯死させるのは本種のみであり（KUBONO and ITO, 2002）、非常にユニークな菌と言える。

感染木から健全木へと *R. quercivora* を運搬するベクターであるカシノナガキクイムシは、ナガキクイムシ科（Platypodidae）に属する体長5mm弱の養菌性キクイムシである。雌雄のペアが樹木内部に深く穿孔し、複雑な坑道内で育てた特殊な共生菌を餌としつづ子どもを育てる高度な亜社会性を有する。なお、病原体である *R. quercivora* は、この餌菌とは別のものであるが、坑道内や虫体の内外に付着していることが確かめられている。

被害木から新成虫が羽化するのは5月以降、6～8月にピークがある。新たな寄主への穿孔もほぼこの時期に生じる。枯損する木はほぼ例外なく、カシノナガキクイムシのマスアタック（集中加害）を受けている。マスアタックの最中は、極めて多数の成虫が木の周囲を飛び回る。寄主当たりの穿孔数はまちまちだが、胸高直径20cmのミズナラの場合、地上2mまでの穿孔数がおおむね100以上になると枯損が生じる確率が高くなるという（市原ら，2009）。

R. quercivora はキクイムシの孔道を伝って周囲の細胞に感染し木部に特徴的な変色をもたらす。変色した部分の道管は根からの水を上げる力を失う結果、その樹木は水切れをおこし、典型的には7～8月に葉が赤褐色に変

色・萎凋し、枯死に到る。

なお、日本のカシノナガキクイムシには遺伝的に大きく異なる二つのタイプが含まれていることが明らかになっている（HAMAGUCHI and GOTO, 2010）。一方は日本海側を中心に全国に広く分布するタイプ（日本海型）であるが、他方は紀伊半島南部、九州南端、屋久島等限られた地域に分布する。「太平洋型」、あるいは「ミナミカシノナガキクイムシ（後藤秀章，私信）」と仮称されるこのタイプは、生態的にも日本海型とは様々な点で異なると考えられる。以下で言及する集合フェロモンに関する研究は、いずれも日本海型でなされたものである。

II 集合フェロモンの探索と利用

1 カシノナガキクイムシ集合フェロモンの発見

上記のように、カシノナガキクイムシは特定の樹木個体に対しマスアタックを行う。マスアタックはナラ枯れのみならず、キクイムシ類による枯損被害の大きな特徴の一つである。マスアタックが生じると、多量の病原菌が樹体に侵入するため、弱い病原性しか持たない菌でも枯死をもたらすことができる。

Platypus 属においては、未交尾のオスが最初に穿孔し、その孔道の入り口で同種の雌雄個体を誘引する集合フェロモンを放出することが知られている。カシノナガキクイムシでも同様に、初期の穿孔に引き続いてマスアタックが見られることから、集合フェロモンを利用して同種の成虫を誘引していることは十分予想されていた（UEDA and KOBAYASHI, 2001）。集合フェロモンの同定と合成が可能になれば、被害林分に存在するカシノナガキクイムシ個体を誘殺する道が開ける。以下では TOKORO et al. (2007) に基づいて、その経緯を述べる。

詳しい行動観察によると、羽化脱出後に飛翔したオスは穿孔初期に排出したフラス（木屑と排泄物等が混じったもの）に、尾端から出した液体を付着させる。この液体に集合フェロモンが含まれている可能性が極めて高い。そこで、集めたフラスのヘッドスペースガスから固相マイクロ抽出法（SPME）によって揮発性成分を捕集した。

こうして得られたオスの放出した揮発性物質に、同種個体を誘引する活性成分があるかどうかを明らかにするため、ガスクロマトグラム直結触角電位検出法（GC-EAD法）を用いた。これは情報化学物質の探索同定に用いられる常套的手法であり、いろいろな候補物質の混じった気体をガスクロマトグラフに導入し、分離分析すると同時に、分離された成分をカシノナガキクイムシ成虫生体から分離した新鮮な触角に当て、その生体電位の

変化によって活性のある成分を検出する方法である。

この方法によって、フラスから抽出した揮発性物質には雌雄の両方に対して強い活性をもつ成分が含まれていることがわかった(図-2)。さらにその主活性成分をガスクロマトグラフ質量分析計などによって分析し、合成化合物との比較分析により化学構造を決定し、(1S,4R)-p-menth-2-en-1-ol であることが突き止められた。合成品を用いた野外での誘引試験により、雌雄双方の成虫を誘引する効果があることから、集合フェロモンとして機能すると考えられる。

この集合フェロモンは、カシノナガキクイムシの種小名に基づき quercivorol (ケルキボロール) と命名された (KASHIWAGI et al, 2006)。ケルキボロールには光学異性

体 (1R,4S)-p-menth-2-en-1-ol が存在し、(1S,4R) と (1R,4S) を等量含むラセミ体にも誘引活性があるが、ケルキボロール単体のほうが野外での誘引活性が強い。

ケルキボロールを主成分 (78%) として含む農薬 (ケルキボロール剤) は平成 24 年 3 月に、「カシナガコール」として農薬登録されている (登録番号 23065 号)。適用害虫はカシノナガキクイムシ、適用作物は「なら類」(生立木、伐倒木)、使用目的は「誘引」である。これにより、コナラ、ミズナラ等に対するカシノナガキクイムシの被害を軽減するために、ケルキボロールをその誘引に使用することが可能となった。

2 カイロモンの存在と協同効果

このように集合フェロモン、ケルキボロールにはカシ

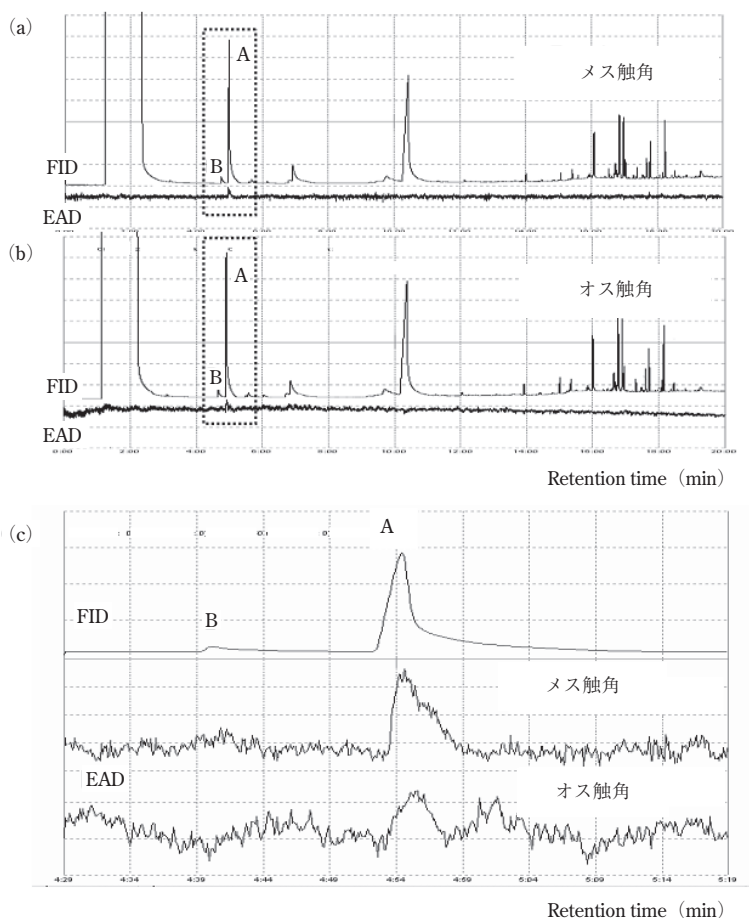


図-2 カシノナガキクイムシ集合フェロモンの探索

未交尾オスが排出したフラスのアセトン抽出物を触角に吹き付け、それをガスクロマトグラフで記録しつつ (a, b, c それぞれ FID と記したグラフ)、触角電位 (EAD と記したグラフ) の変化を見る。a, b はそれぞれメス成虫、オス成虫の触角。c は a, b の点線枠で囲った部分の拡大図。A : EAD で活性のあったピーク、B : A の異性体。Tokoro et al. (2007) を改変。

ノナガキクイムシを誘引する効果がある。しかし野外試験が進むにつれ、ケルキボロール単独の誘引効果だけでは、林内の個体数を十分に下げるには限界があることも明らかとなってきた。その一つの原因として考えられたのは、集中加害に際してカシノナガキクイムシが集合フェロモンに加えて他の信号を利用している可能性である。

穿孔に際しては多量のフラスが排出され、フラスや、穿孔孔から木部内部の匂い成分が放出される。フェロモンが同種個体間での情報伝達に用いられる化学物質であるのに対して、異種生物が発する物質を他種が利用する場合、利用する側から見てこの物質をカイロモンというが、カシノナガキクイムシのマスアタックに際しては、集合フェロモンばかりでなく樹木由来のカイロモンも必要なのかもしれない。

そこで加害された樹木から放出される揮発成分を捕集し、フェロモンと同様に、GC-EAD 法を用いて活性のあるカイロモン候補物質の探索がなされた。数多くの候補物質の中から、エタノールに集合フェロモンと最も強い協力作用があることがわかり（所ら, 2011）、野外試験でも集合フェロモンに加えてエタノールを揮散させたトラップで同様の効果が得られることが確認された（斉藤ら, 2008）。したがって集合フェロモンを、協力剤のエタノールと併用することで、誘引効果の上昇が期待できる。

III おとり木トラップ法

1 原理

こうして集合フェロモン、およびその誘引性を高める協力剤としてのエタノールの効果が確かめられたが、ナラ枯れ防除にこれらを活用するにはどうしたらよいだろうか。林内のカシノナガキクイムシ個体数を顕著に減らすことで、枯損本数を減少させるのが私たちの目標なので、要するに「できるだけたくさん誘殺するにはどうしたらよいか」という、言ってしまうと単純な問題である。

誘引器に誘引剤を取り付けて用いるのも一つの方法である。しかしマスアタックを受けた樹木からは、翌年、材積 1 m^3 当たり 1～5 万頭程度のカシノナガキクイムシが脱出すると推定されている（小林・野崎, 2003）。誘引器と誘引剤を用いた予備的な試験からは、数万頭単位の誘殺は難しそうであった。

そのため考え出されたのがおとり木トラップである。誘引剤を使って大量に捕殺するという原理は同じだが、ここでは誘引器を使わず、生きている樹木に誘引剤を取り付け、カシノナガキクイムシをそこに誘導することで、マスアタックを意図的に起こさせるのである。おと

り木トラップは、誘引器と比べて、①機材の費用が発生しない、②一般的な誘引器と比べて表面積が大きく、飛行中のカシノナガキクイムシが接触しやすい、③おとり木トラップに穿孔したカシノナガキクイムシ自体が天然の集合フェロモンを放出することで、誘引力の飛躍的増強を期待できる、等の利点がある。

しかし、マスアタックを受けたおとり木が枯れてしまつては困る。ここで殺菌剤の出番となる。ナラ枯れ用の殺菌剤としては、ベノミル水和剤を主成分とするものと、トリホリン乳剤を主成分とするものの 2 種類が既に市販されている。いずれも感染前の健全な木に樹幹注入することによって、後に侵入する病原菌のまん延をふせぐ予防用の薬剤として開発されたものである。あらかじめ殺菌剤を注入しておくことで、多くの個体に穿孔加害されても枯死しない「おとり木」を作ることができるのだ。

おとり木に殺菌剤を注入しておくことにはもう一つの意味がある。カシノナガキクイムシが共生菌を培養して餌としていることは先に述べた通りだが、殺菌剤はこの共生菌の発育も阻害するため、孔道内部のカシノナガキクイムシはその生存と繁殖をいわば「兵糧攻め」によって妨害される。このようにおとり木トラップは、自らマスアタックの標的となることで林内のカシノナガキクイムシ密度を減らすとともに、穿孔にした虫の繁殖を妨げ、かつ自らも生き残るという利点を持っている。

2 設置と防除効果

おとり木トラップ法は開発されてから日が浅く、確立した施工法はまだないが、ここでは山形県で行われた試験結果を紹介する（森林総合研究所, 2011）。

試験はミズナラやコナラを主とした 0.1 ha の落葉広葉樹林において、カシノナガキクイムシ脱出前の 5～6 月に行われた（図-3）。この中に 4 本のおとり木を設置した。おとり木には、あらかじめ殺菌剤を樹幹注入したうえで、合成集合フェロモン（ケルキボロール）を揮散用の容器にいれて樹幹につり下げた。カイロモンとしては、上記のようにエタノールが有効な協力作用を持つことがわかっているが、この試験では樹木に何か所かドリルで穿孔し、揮発成分を放散させるようにした。さらに、おとり木周囲の 10 数本には、殺菌剤の樹幹注入のみを行った。これは、おとり木周囲に誘引されたカシノナガキクイムシが、近隣の木に穿孔した際に枯損を防ぐためである。

こうした試験地（処理区）を、微害地（ナラ枯れによる枯死木が 10 本/ha 未満）、中害地（10～100 本/ha 未満）、激害地（100 本/ha 以上）のそれぞれに設定し、また比較のために、おとり木トラップを施用しない対照



図-3 おとり木トラップの設置法

A: 殺菌剤の注入, B: カイロモン放出のためのドリル穿孔, C: 集合フェロモンの揮散容器, D: おとり木トラップ外観, E: おとり木トラップ配置の模式図。

0.1 ha の中に, おとり木 (黒丸) と殺菌剤のみ注入した木 (白丸) を配置. (森林総合研究所 (2011) を改変)。

地 (無処理区) を, それぞれの試験地と対になるように近くに設定した。当然ながら, 微害地では林内や近隣のカシノナガキクイムシ個体群密度は低く, 激害地では高いはずである。おとり木トラップで同じ数の虫をとっても, 枯損防止効果は異なると予想されたため, このように被害程度に応じた試験設定とした。

結果は図-4 に示す通りである。誘引されたカシノナガキクイムシ数は被害程度とはあまり関係なく 0.1 ha 当たり 4 ~ 6 万頭程度であったが, 無処理区と比べた場合の処理区の枯損木数は, 微害地では約 1 割程度までに減少したのに対し, 激害地では 4 割程度に過ぎない。激害地では, たとえ 4 割にまで減っても枯損木数がもともと多いため, 有効とは言いがたい。激害地ではおとり木以外の木に対して, 多くのマスアタックが生じるため, 被害の減少効果が小さいと考えられる。一方, 微害地に関してはこの方法がかなり有効であることがこの実験から示唆される。

この試験結果から, おとり木トラップ法は, 新たな被害が発生した直後の微害地で, もしくは近接林分にまで被害が接近してきた未被害地に対してすみやかに施用することで初めて効果が期待できると考えるべきである。

3 問題点

おとり木トラップをナラ枯れ防除対策として実用化するにあたっては, 解決すべき点が多い。一つはコストである。集合フェロモン剤「カシナガコール」はすでに市販が開始されているが, まだ高価である。広範な利用を期待するにあたっては, おとり木トラップを構成するエ

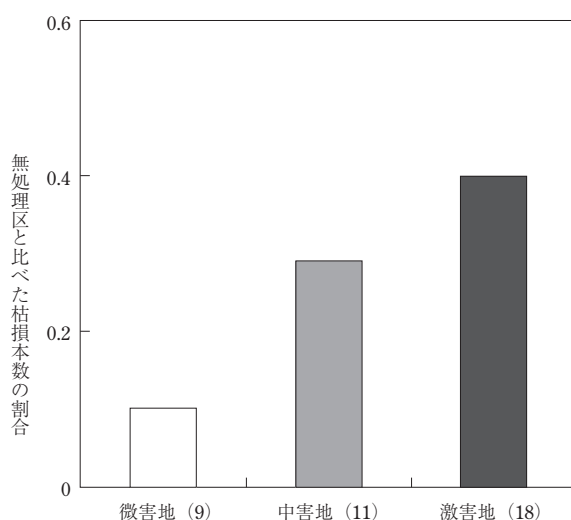


図-4 おとり木トラップを設置した林分と, 設置しなかった林分 (無処理区) とで枯損木数を比較 (平均値) 試験地の枯損状況に応じて, 微害, 中害, 激害に分けた。カッコ内の数値はサンプル数. (森林総合研究所 (2011) の図 8 を改変)。

タノール剤, 殺菌剤も含めて, トータルコストが可能な限り抑えられることを期待したい。

コストとも関係するが, 施用法の簡略化も急務である。フェロモン剤とエタノール剤については, 最終的な施用法は未定であるものの, さほど労力は要しないと思われる。しかし殺菌剤は, ドリルで穿孔した後, 木の直

径に合わせた本数の殺菌剤入りボトルを差し込み、注入完了後にボトルを回収しなければならない。これだけでも大きなコストであり、簡便な注入法の開発が望まれる。

また、上記のようにおとり木トラップ法の効果を示す試験例はあるものの、まだ例数が少ない。林相、地形、気象等、条件の異なる多くの林分での試験を行ったうえで、効果とその限界をより明確に示す必要がある。

おわりに

カシノナガキクイムシの集合フェロモンの構造が明らかになり、合成が可能となったこと、またおとり木トラップという有効な利用法が開発されたことは、「ナラ枯れ戦線」で苦戦を強いられている私たちには一つの朗報であった。上で述べたように実用化に向けて解決すべき点は多いが、関係者の努力によって有効な武器に育つことを期待したい。また研究者は、新たな武器（防除技術）の開発はもちろんだが、数多く開発されてきた既存の武器の適性と有効性を検証しながら、場面に応じた防除戦略を示す必要がある。

なおここで紹介したカシノナガキクイムシ集合フェロモンやおとり木トラップ法に関する研究・開発は、おもに「ナラ類集団枯死被害防止技術と評価法の開発（平成17～19年）」、「ナラ類集団枯損の予測手法と環境低負荷型防除システムの開発（平成20～22年）」等の成果

である。研究の進行にあたってお世話になった農林水産技術会議事務局、林野庁等の関係諸機関、およびこれらのプロジェクトに携わったすべての研究者に心よりお礼申し上げる。

引用文献

- 1) HAMAGUCHI, K. and H. GOTO (2010): Applied Entomology and Zoology **45**: 319 ~ 328.
- 2) 市原 優ら (2009): 東北森林科学会誌 **14**: 7 ~ 11.
- 3) 伊藤進一郎 (2002): ナラ・カン類の枯死被害に関連する菌類とその病原性 森をまもる, 全国森林病虫獣害防除協会, 東京, p. 87 ~ 95
- 4) KASHIWAGI, T. et al. (2006): Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry **70**: 2544 ~ 2546.
- 5) 衣浦晴生 (2002): 森をまもる, 全国森林病虫獣害防除協会, 東京, p. 75 ~ 86.
- 6) 小林正秀・野崎 愛 (2003): 森林応用研究 **12**: 143 ~ 149.
- 7) ———・上田明良 (2005): 日本森林学会誌 **87**: 435 ~ 450.
- 8) KUBONO, T. and S. ITO (2002): Mycoscience **43**: 255 ~ 260.
- 9) 黒田慶子 (2011): 植物防疫 **65**: 162 ~ 165.
- 10) ———ら (編著) (2008): ナラ枯れと里山の健康, 全国林業改良普及協会, 東京, 166 pp.
- 11) 林野庁 (2011): ナラ枯れ被害調査の結果について (速報値) <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hogo/120117.html>
- 12) 齊藤正一ら (2008): 東北森林科学会誌 **13**: 1 ~ 4.
- 13) 森林総合研究所 (2011): ナラ枯れに立ち向かう—被害予測と新しい防除法— <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/2nd-chukiseika19.pdf>
- 14) TOKORO, M. et al. (2007): Bulletin of FFPRI **6**: 49 ~ 57.
- 15) 所 雅彦ら (2011): 第122回森林学会 (講要) Pa2-101.
- 16) UEDA, A. and M. KOBAYASHI (2001): Journal of Forest Research **6**: 173 ~ 179.

農林水産省プレスリリース (24.9.16 ~ 24.10.15)

農林水産省プレスリリースから、病害虫関連の情報を紹介します。

<http://www.maff.go.jp/j/press/syouan> の後にそれぞれ該当のアドレスを追加してご覧下さい。

◆平成24年度病害虫発生予報第8号の発表について (10/11)

/syokubo/121011.html