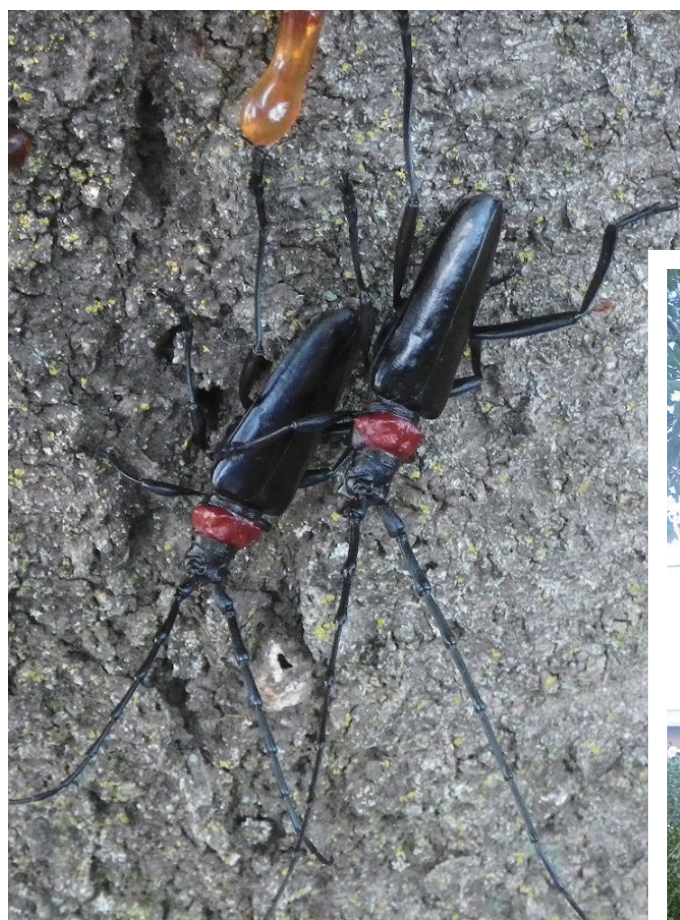


# 森林防疫

FOREST PESTS

— 森の生物と被害 —



## 目次

### 論文

- 三重県の落葉広葉樹林におけるニホンジカの採食による下層植生衰退の  
広域的評価  
[福本浩士・鬼頭敦史・山端直人] . . . . . 3
- 数樹種の細枝に接種したクビアカツヤカミキリ孵化幼虫の発育  
[北島 博] . . . . . 11
- 東・東南アジアで採取された*Raffaelea quercivora*類縁菌6菌株の  
ミズナラに対する病原性  
[鳥居正人・山田利博・SEO, Sang-Tae・THU, Pham Quang・WU, Meng-Ling・  
BURANAPANICHPAN, Sawai・中島千晴・松田陽介・伊藤進一郎] . . . . . 17
- マルチコプター型無人航空機を使った大型哺乳類センサスの可能性  
[丹羽悠二・遠國正樹・木村恒太・楠本 大] . . . . . 25
- 都道府県だより：埼玉県 . . . . . 31
- 林野庁だより：人事異動（平成30年4月1日） . . . . . 35
- 森林防疫ジャーナル . . . . . 35
- 森林病虫獣害発生情報：平成30年3月・4月受理分 . . . . . 36



A



B

[表紙写真] クビアカツヤカミキリ成虫とサクラ被害木の様子

写真A：クビアカツヤカミキリ成虫（群馬県邑楽郡邑楽町において、2017年7月に撮影）

クビアカツヤカミキリは、ロシア極東部、モンゴル、中国各地、朝鮮半島、北ベトナムに自然分布し、我が国では栃木県、群馬県、埼玉県、東京都、愛知県、大阪府、徳島県で発生が認められている外来種である。成虫の体長は約30～40mmで、雄の方が触角が長い。昼行性で、樹幹上で交尾、マウント、歩行している姿が観察できるほか、気温が高い時は飛翔も見られる。

写真B：クビアカツヤカミキリ幼虫によるサクラ被害木の様子（群馬県邑楽郡邑楽町において、2017年9月に撮影）

我が国におけるクビアカツヤカミキリの被害は、バラ科のサクラ、モモ、ウメに認められている。幼虫は内樹皮を摂食した後、木部に穿孔する。大量のフラスを排出し、排出時に樹液がからまると、“ひき肉状”と称される特徴的な形状となる。根元付近への加害が多いが、枝部への加害も見られる。枝での発育については本誌11ページ参照。

（森林総合研究所 北島 博）



## 論文

# 三重県の落葉広葉樹林におけるニホンジカの採食による下層植生衰退の広域的評価

福本浩士<sup>1</sup>・鬼頭敦史<sup>2</sup>・山端直人<sup>3</sup>

## 1. はじめに

近年、ニホンジカ（以下 シカ）の分布域拡大および個体数増加に伴い苗木の食害や剥皮害の増加（小泉 2009）だけでなく、過度の採食による自然植生への影響が危惧されている（梶・飯島 2017；前迫・高槻 2015；Suzuki *et al.* 2008；Takatsuki 2009；湯本・松田 2006）。とくに、森林の下層植生の衰退は、表層土壌の流出（例えば、初ら 2010；内田ら 2012）、生物多様性の低下（例えば、片桐 2017；柴田・日野 2009）などの森林のもつ公益的機能の低下を招く恐れがある。このため、シカの個体群や被害の状況をモニタリングし、科学的にシカ個体群を管理していく特定鳥獣管理計画が多くの都道府県で策定されている（宇野ら 2007）。農林業被害については、被害金額等を指標として継続的なモニタリングが行われてきたが、森林生態系被害の把握については広域的に評価可能な手法が確立しておらず、シカが過密度状態で生息している一部の地域においてのみ詳細な被害調査が行われているに過ぎなかった。

そのような中、植生学会が2009年から2010年にかけてシカアンケート調査を実施し、シカによる植生への影響について統一基準で広域的な実態把握と評価を行った（植生学会企画委員会 2011）。ただし、この調査では食痕などの観察に基づく評価の目安は示されているが、主観的な判断によるものであり基準が明確でない、調査地点に地域的な偏りがあるなど課題点も多く残されている（明石 2013）。そのため、Fujiki *et al.* (2010) は落葉広葉樹林（アカマツ林も含む）の下層植生の衰退度（shrub-layer decline rank；SDR）を森林生態系の衰退の簡易指標として用い、チェックシートを利用した簡易目視調査を導入することで、少ない労力で広域多地点調

査を可能にする手法を開発した。この方法は、1) シカの採食による下層植生の衰退程度が評価できること、2) 森林構造全体の衰退程度も評価できること、3) 県域スケールまたは隣接都道府県を含めた地方スケールで被害の空間推定ができること、4) 被害の経年的な変化を定量評価できることが利点である（藤木 2012；藤木ら 2014）。

これまでに、近隣の兵庫県、京都府、福井県、滋賀県、大阪府、岐阜県において落葉広葉樹林におけるSDR調査が実施されており（藤木ら 2014；幸田ら 2014；角田ら 2017）、三重県においてもシカによる森林生態系被害を把握するため、行政サイドからSDR調査の早急な実施が求められていた。そこで、県内の落葉広葉樹林を対象として下層植生の衰退度を明かにして森林構成要素との関連性を検証するとともに、三重県特定鳥獣管理計画（ニホンジカ）を策定・変更していく上での基礎データとした。

## 2. 調査地と方法

2016年6月から10月にかけて、宮川流域以北に存在する落葉広葉樹林およびアカマツ林を対象として、5 km×5 kmメッシュに少なくとも1カ所以上となるよう調査林分を選定し（図-1）、アカマツ林14林分、アベマキ・コナラ林105林分、クリ・ミズナラ林7林分、その他19林分の合計145林分で現地調査を実施した。調査林分は林冠の高さが10m以上で、林冠が閉鎖しており、伐採痕などの人為的攪乱がなく、林縁部からの入射光が入らないこと、アセビ等の不嗜好性植物が優占しないことを条件とした（藤木 2012）。各調査林分において、低木層の被度が平均的な区画に20m四方の調査区を設定し、調査区の中央において携帯型GPS（Garmin GPS map64sまた

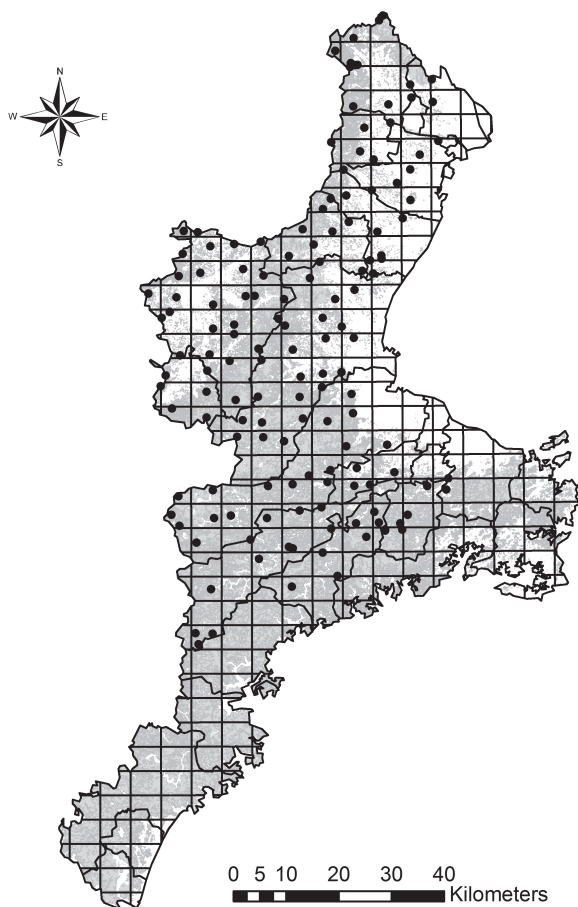


図-1 下層植生衰退度 (SDR) の現地調査位置  
黒丸は現地調査位置，灰色で着色した部分は森林域を示す。

はmap60csx) を用いて緯度，経度，標高，金属製クリノメーター (松尾式) を用いて傾斜，方位コンパスを用いて方位を測定した。

調査区内をくまなく踏査し，シカの痕跡 (採食痕，糞，シカ道) の有無と低木層 (樹高1~3mの植物) の植被率とササ類の植被率を目視により5段階 (50%以上，50%未満25%以上，25%未満10%以上，10%未満1%以上，1%未満) に区分して記録した。また，森林の構成要素の被害状況を把握するため，林冠木の剥皮の有無，シカの嗜好性が高い亜高木性樹種であるリョウブの剥皮個体割合 (50%以上，50%未満25%以上，25%未満10%以上，10%未満，0%)，シカの嗜好性が高い低木種であるアオキの分布および食害の有無，シカの採食耐性が高い低木種であるイヌツゲの分布および食害の有無，高木性樹

種の稚幼樹の有無を記録した。さらに，落葉層の被覆度を4段階 (95%以上，95%未満75%以上，75%未満50%以上，50%未満) ，表層土壌の面状侵食割合を4段階 (10%未満，25%未満10%以上，50%未満25%以上，50%以上) に区分して記録した。なお，現地調査の際には，シカによる森林植生衰退状況調査表ver.2 (藤木 2012) を一部改変して使用した。

### 3. データ解析

各調査地点のシカによる下層植生衰退度 (SDR) については，Fujiki *et al.* (2010) および藤木 (2012) に従い，低木層の木本類の植被率とササの植被率の植被率カテゴリーの中央値を合計した値と過去数年以内のシカの食痕の有無により6段階で判定した。すなわち，無被害 (ND) : シカの食痕が全く確認されなかった林分，衰退度0 (D0) シカの食痕がある林分のうち，低木層の植被率が75.5%以上の林分，衰退度1 (D1) 低木層の植被率が75.5%未満38%以上のシカの食痕あり林分，衰退度2 (D2) 低木層の植被率が38%未満18%以上のシカの食痕あり林分，衰退度3 (D3) 低木層の植被率が18%未満6%以上のシカの食痕あり林分，衰退度4 (D4) 低木層の植被率が6%未満のシカの食痕あり林分である (写真-1)。

算出したSDRと森林構成要素の被害状況との関連性を検証するため，カテゴリカルデータの相関関係を扱うグッドマン・クラスカルの $\gamma$ を用いて相関分析を実施した。この解析には，SPSS ver.11.5 (SPSS Inc.) を用いた。

広域スケールでの被害の空間推定を行うため，調査地点データをGIS上に取り込んだ上で，調査地点から非調査地点のSDRを推定した (Fujiki *et al.* 2010; 藤木 2012)。非調査地点のSDRの推定にはIDW法 (Inverse distance weighting) を採用した。補間にあたり，各調査地点の下層植生衰退度の値を0~5の整数値に変換し，調査地域を20m四方の格子メッシュに区切り，それぞれのメッシュから近隣6個の調査地点のSDRデータを用いて，距離の2乗の逆数に応じて重みづけした平均値を算出した。算



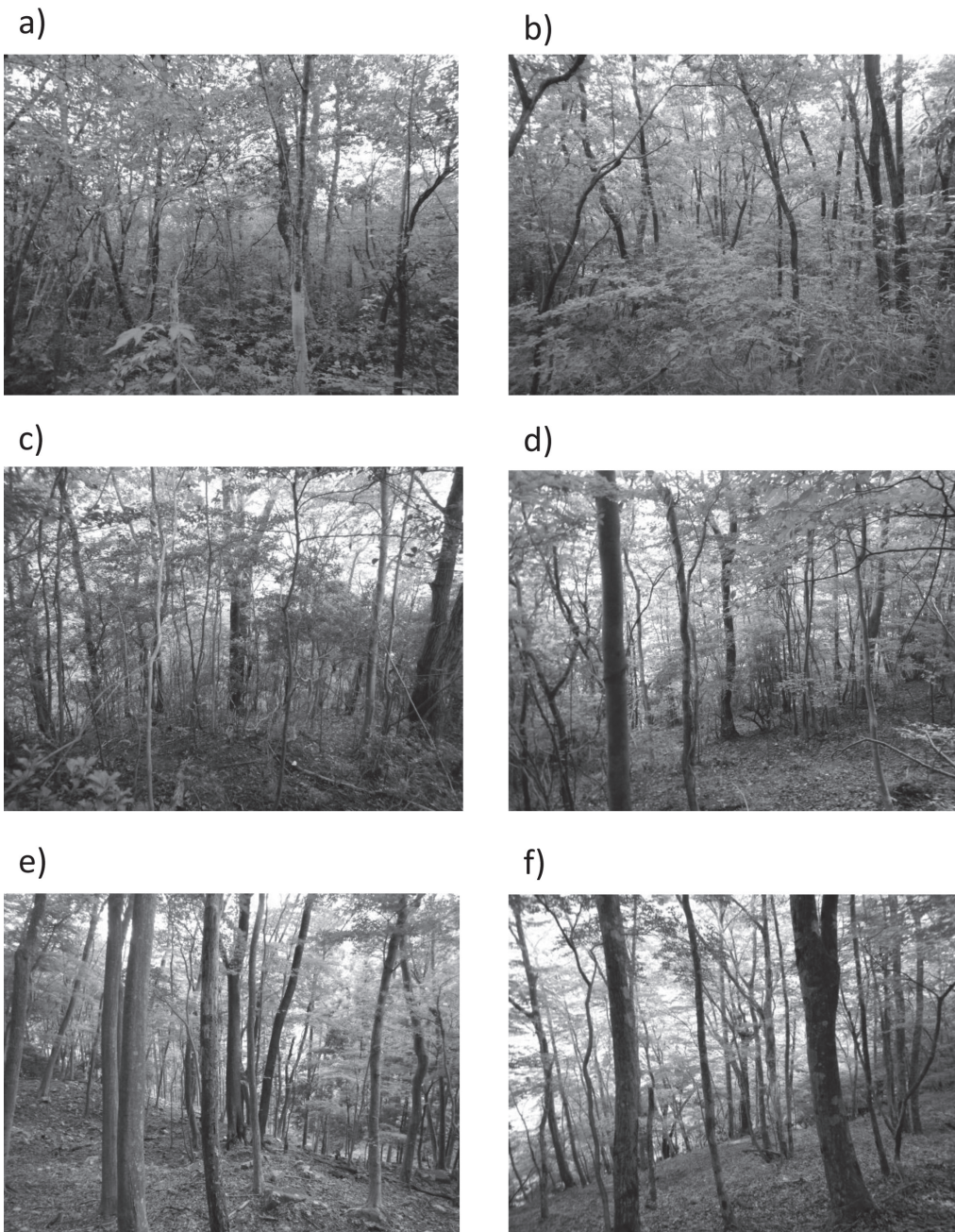


写真-1 各衰退度ランクにおける森林の状況  
a) 無被害 (ND), b) 衰退度0 (D0), c) 衰退度1 (D1), d) 衰退度2 (D2), e) 衰退度3 (D3),  
f) 衰退度4 (D4).

出された値は小数点以下を四捨五入して整数値に戻すことで元のSDRに変換した。GISによる解析はArcGIS10.5.1 Spatial Analysis Extension (ESRI社)を用いた。

#### 4. 結果と考察

##### (1) 三重県における下層植生衰退度の状況

現地調査を実施した県内の落葉広葉樹林およびアカマツ林145林分のうち、シカの痕跡が確認されなかった林分が23林分、衰退度0の林分が26林分、衰

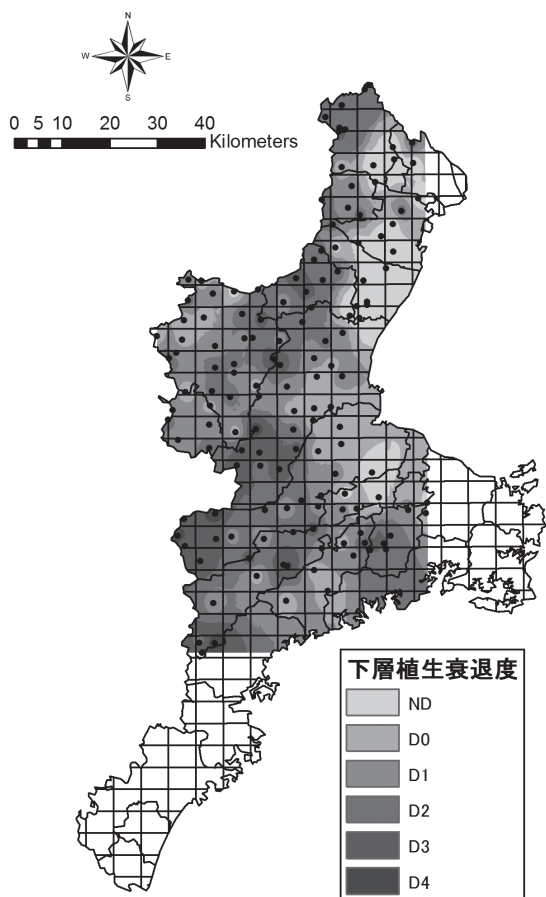


図-2 三重県の落葉広葉樹林における下層植生の衰退状況

衰退1の林分が30林分、衰退度2の林分が37林分、衰退度3の林分が22林分、衰退度4の林分が7林分であった。図-2に三重県における下層植生の衰退状況、図-3に緯度・標高と衰退度との関係を示す。SDRが大きいと推定された地域は、鈴鹿山脈、布引山地、高見山地、台高山脈などの高標高域であったのに対し、シカの痕跡が無い地域やSDRが小さいと推定された地域は、伊賀盆地北西部、伊勢平野の都市周辺部などの低標高域であった。種の多様性調査哺乳類分布調査報告書（環境省自然環境局生物多样性センター 2004）と比較すると、本研究によりSDRが大きいと推定された地域（衰退度2, 3および4の地域）は1978年以降シカの生息が確認されている地域、SDRが小さいと推定された地域（衰退度0の地域）は2003年に生息が確認された地域とほぼ

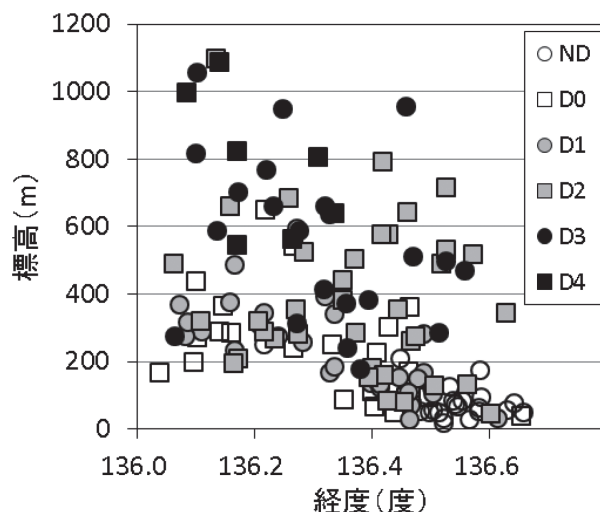


図-3 下層植生衰退度 (SDR) と経度・標高の関係

一致していた。この結果は、下層植生の衰退は継続的なシカの高い採食圧によってもたらされる累積的な効果であることを示している。

本研究により、岐阜県、滋賀県との県境をなす鈴鹿山脈で下層植生が大きく衰退していることが明らかとなった（図-2）。鈴鹿山脈の滋賀県、岐阜県側においても同様に下層植生の衰退が進行していることが報告されている（藤木ら 2014；角田ら 2017）。また、伊賀地域北西部はSDRが小さい地域であったが、隣接する滋賀県や京都府でも三重県同様にSDRは小さくなっている（藤木ら 2014）。兵庫県、京都府、滋賀県、福井県の4府県のデータを用いた衰退程度の空間推定結果でも府県境の両側において推定結果が大きく異なることはなく、整合性のある結果となっている（藤木ら 2014）ことから、三重県における推定結果も他地域と同水準の精度で評価できていると考えられる。

## (2) 森林の構成要素の被害と衰退度との関係

高木性樹種の稚幼樹の有無、林冠木の剥皮の有無、低木種であるアオキの分布とイヌツゲの食害の有無はSDRと相関関係が認められた（表-1）。高木性樹種の稚幼樹は、SDRが大きくなるほど「稚樹あり」の林分割合が減少した ( $n=145$ ,  $\gamma=-0.258$ ,  $p=0.022$ , 図-4 a)。林冠木の剥皮はSDRが大きくな



表-1 下層植生衰退度 (SDR) と森林構成要素の被害との相関関係

変数	<i>n</i>	$\gamma$	<i>p</i>
すべての林分			
林床における高木種樹種の稚幼樹の有無	145	-0.258	0.022
林冠木の剥皮の有無	145	0.361	0.049
リョウブの剥皮個体割合	75	0.330	0.269
アオキの分布の有無	145	-0.685	<0.001
イヌツゲの食害の有無	62	0.737	0.007
斜面勾配20°超の林分			
落葉層の被覆率	103	-0.171	0.170
土壌の面状侵食割合	103	0.192	0.151
斜面勾配20°以下の林分			
落葉層の被覆率	42	-0.167	0.490
土壌の面状侵食割合	42	-	-

るほど、「剥皮あり」の林分割合が増加した ( $n=145$ ,  $\gamma=0.361$ ,  $p=0.049$ , 図-4 b)。アオキの分布は、SDRが大きくなるほど「分布あり」の林分割合が減少した ( $n=145$ ,  $\gamma=-0.685$ ,  $p<0.001$ , 図-4 c)。イヌツゲの食害は、SDRが大きくなるほど「食害あり」の林分割合が増加した ( $n=145$ ,  $\gamma=0.737$ ,  $p=0.007$ , 図-4 d)。一方、亜高木層の構成種であるリョウブの剥皮個体割合はSDRとの間に有意な関係はみられなかったが ( $n=75$ ,  $\gamma=0.330$ ,  $p=0.269$ , 表-1), D0以上のカテゴリにおいてSDRの大きさに関わらず50%以上の個体が剥皮されている林分の割合が約9割に達した (図-4 e)。これまでに兵庫県, 京都府, 滋賀県, 福井県, 岐阜県で実施された調査では, リョウブの剥皮個体割合とSDRの間に有意な正の相関が認められている (藤木ら 2014; 角田ら 2017)。おそらく三重県では, 生育する植物種の中でリョウブが極めて嗜好性の高い樹種として位置づけられており, シカが低密度の段階から優先的に剥皮したためであると考えられる。

落葉層の被覆率は, 斜面勾配が20°以下の場合, 衰退度3と4の林分においてのみ被覆率が75%以下の事例が確認されたが, SDRの大きさと被覆率の間に有意な相関関係は確認されなかった ( $n=42$ ,  $\gamma=-0.167$ ,  $p=0.490$ , 図-5 a, 表-1)。斜面勾配が20°を越えると, 衰退度0の林分でも被覆率75%

以下の林分が確認されたが, SDRの大きさと被覆率の間に有意な相関関係は確認されなかった ( $n=103$ ,  $\gamma=-0.171$ ,  $p=0.170$ , 図-5 b, 表-1)。表層土壌の面状侵食割合は, 斜面勾配が20°以下の場合, いずれのSDRにおいても面積割合が10%未満であった (図-5 c)。斜面勾配が20°より大きい場合, 侵食割合50%以上の林分の割合はSDRが大きくなるほど増加する傾向がみられたが, 有意な相関関係は確認されなかった ( $n=103$ ,  $\gamma=0.192$ ,  $p=0.151$ , 図-5 d, 表-1)。兵庫県においても斜面勾配20°以下の林分では, 表層土壌の面状侵食割合はSDRと明瞭な関係がなく (Fujiki *et al.* 2010), また, 兵庫県, 京都府, 滋賀県, 福井県においても斜面勾配25°未満の林分では落葉層の被覆度と表層土壌の侵食割合はSDRの大きさとは無関係であった (藤木ら 2014)。一方, これら4府県において斜面勾配25°以上の林分では, 落葉層の被覆率, 表層土壌の面状侵食割合はSDRと有意な相関関係が認められている。三重県においても両変数とSDRと間に有意な相関関係はみられなかったが, 相関係数の正負の傾向は一致していた。下層植生が衰退すると重力や地表流による落葉の斜面下部への移動が起りやすくなり, 斜面勾配が急になるほどその影響は大きくなる (Fujiki *et al.* 2010)。その結果, 落葉層の減少に伴い土壌層の露出が起り, 雨滴の衝撃に

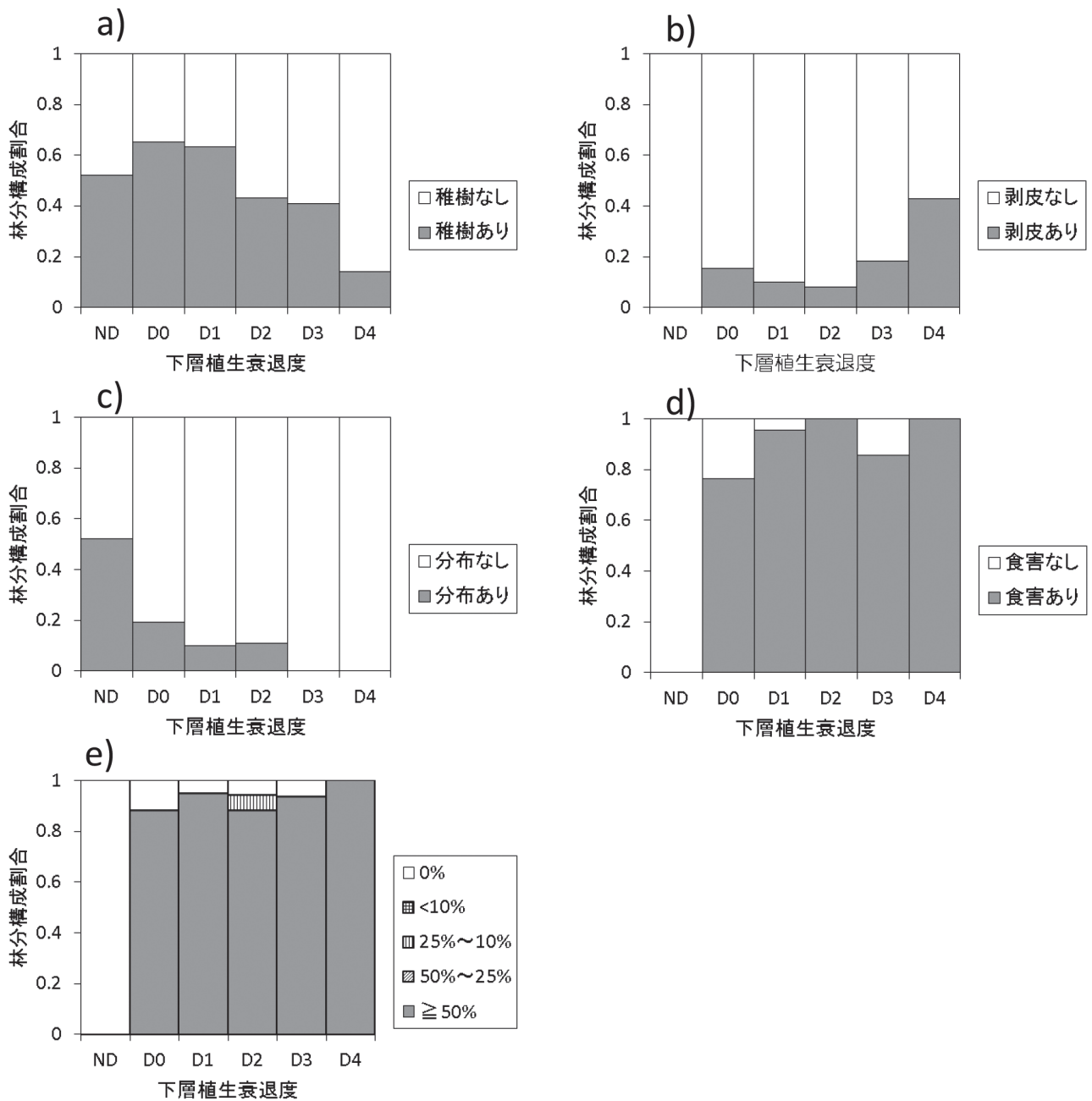


図-4 森林構成要素と下層植生衰退度 (SDR) の関係

a) 高木性稚幼樹の有無, b) 林冠木の剥皮の有無, c) アオキの分布の有無, d) イヌツゲの食害の有無, e) リョウブの剥皮個体割合.

よる表層土壌の侵食が増大するものと考えられる (Fujiki *et al.* 2010)。今後, 三重県においても下層植生の衰退に伴い, 落葉層の消失, 表層土壌の侵食が進行していく可能性がある。

## 5. おわりに

本研究により, 三重県北中部地域の落葉広葉樹林における下層植生の衰退状況が初めて明らかとなり, 森林構成要素の被害状況との関連性を確認することができた。これにより, 三重県においても近隣府県



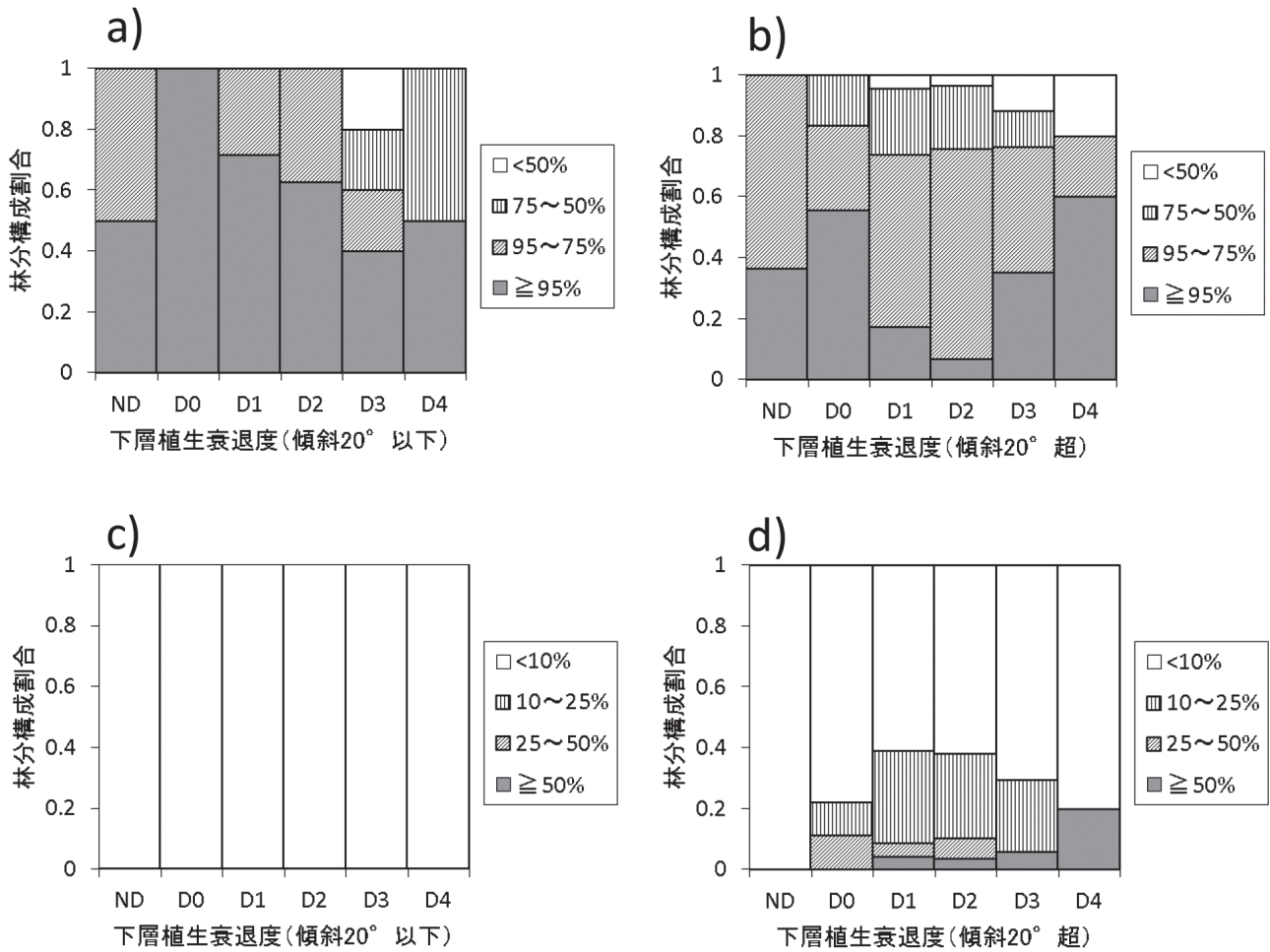


図-5 森林構成要素と下層植生衰退度 (SDR) の関係

a) 落葉層の被覆率 (傾斜勾配20°以下), b) 落葉層の被覆率 (傾斜勾配20°超), c) 表層土壌の面状侵食割合 (傾斜勾配20°以下), d) 表層土壌の面状侵食割合 (傾斜勾配20°超).

と同様にSDRを指標として森林生態系への被害状況を広域的に評価することが可能となった。一方、熊野灘沿岸部の三重県南部地域は常緑広葉樹林を主体とした森林であり、SDRによる被害評価手法は採用できない。そのため、様々なタイプの森林でも適用可能な手法 (例えば、明石ら 2013; 藤木 2013; Iijima and Nagaike 2014; 矢部・柳田 2016) を採用することで、三重県全域におけるシカの森林生態系への影響度を明らかにすることができるであろう。また、森林生態系への影響度とシカ生息密度との関連性を導き出すことができれば、科学的データに基づくシカ個体群の管理が可能となるであろう。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、兵庫県立大学自然・環境科学研究所の藤木大介准教授には野外調査とデータ解析について多くのご助言をいただいた。三重森林管理署には国有林内での野外調査に便宜を図っていただいた。三重県林業研究所の職員の皆様には現地調査に協力していただいた。ここに記して、厚く御礼申し上げる。

本研究は、平成28年度岡三加藤文化振興財団研究助成金により実施した。

### 引用文献

明石信廣・藤田真人・渡辺 修・宇野裕之・萩原

- 裕 (2013) 簡易なチェックシートによるエゾシカの天然林への影響評価. 日林誌 95: 259 ~ 266
- 初 磊・石川芳治・白木克繁・若原妙子・内山佳美 (2010) 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における林床合計被覆率と土壌侵食量の関係. 日林誌 92: 261 ~ 268
- Fujiki D, Kishimoto Y, Sakata H (2010) Assessing decline in physical structure of deciduous hardwood forest stands under sika deer grazing using shrub-layer vegetation cover. *J For Res* 15: 140 ~ 144
- 藤木大介 (2012) ニホンジカによる森林生態系被害の広域評価マニュアル. 兵庫ワイルドライフモノグラフ 4: 17 ~ 31
- 藤木大介 (2013) 淡路島におけるニホンジカの影響を受けた広葉樹林の地理的分布域の推定. 兵庫ワイルドライフレポート 2: 1 ~ 11
- 藤木大介・酒田真澄美・芝原 淳・境 米造・井上 徹夫 (2014) 関西 4 府県を対象としたニホンジカの影響による落葉広葉樹林の衰退状況の推定. 日緑工誌 39: 374 ~ 380
- Iijima H, Nagaike T (2014) Appropriate vegetation indices for measuring the impacts of deer on forest ecosystem. *Ecol Indi* 48: 457 ~ 463
- 梶 光一・飯島勇人 (2017) 日本のシカ 増えすぎた個体群の科学と管理. 東京大学出版会, 東京
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2004) 第 6 回自然環境保全基礎調査 種の多様性調査 哺乳類分布調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 213pp
- 片桐奈々 (2017) 間伐後のヒノキ人工林においてニホンジカの採食が下層植生を利用する節足動物群集に及ぼす影響. 森林防疫 66: 19 ~ 27
- 幸田良介・虎谷卓哉・辻野智之 (2014) ニホンジカによる森林下層植生衰退度の広域分布状況. 大阪府立環農水研報 1: 15 ~ 19
- 小泉 透 (2009) 拡大する「沈黙の被害」: ニホンジカによる剥皮害. 森林防疫 58: 3 ~ 4
- 前迫ゆり・高槻成紀 (2015) シカの脅威と森の未来 シカ柵による植生保全の有効性と限界. 文一総合出版, 東京
- 柴田叡弐・日野輝明 (2009) 大台ヶ原の自然誌. 東海大学出版会, 神奈川
- 植生学会企画委員会 (2011) ニホンジカによる日本の植生への影響 - シカ影響アンケート調査 (2009 ~ 2010) 結果 -. 植生情報 15: 9 ~ 96
- Suzuki M, Miyashita T, Kabaya H, Ochiai K, Asada M, Tange T (2008) Deer density affects ground-layer vegetation differently in conifer plantations and hardwood forests on the Boso Peninsula, Japan. *Eco Res* 23: 151 ~ 158
- Takatsuki S (2009) Effects of sika deer on vegetation in Japan: A review. *Biol Conserv* 142: 1922 ~ 1929
- 角田裕志・和田 敏・安藤正規 (2017) 岐阜県におけるニホンジカによる落葉広葉樹林の下層植生衰退状況の把握. 野生生物と社会 4: 39 ~ 46
- 宇野裕之・横山真弓・坂田宏志・日本哺乳類学会シカ保護管理検討作業部会 (2007) ニホンジカ個体群の保全管理の現状と課題. 哺乳類科学 47: 25 ~ 38
- 内田 圭・岸本康誉・藤木大介 (2012) 兵庫県本州部の落葉広葉樹林域におけるニホンジカによる土壌浸食被害の現状. 兵庫ワイルドライフモノグラフ 4: 69 ~ 90
- 矢部恒晶・柳田蓉子 (2016) イヌツゲの樹形によるニホンジカ採食圧の簡易指標の検討. 九州森林研究 69: 171 ~ 173
- 湯本貴和・松田裕之 (2006) 世界遺産をシカが喰うシカと森の生態学. 文一総合出版, 東京
- (2017.12.4受付, 2018.1.7掲載決定)



## 論文

# 数樹種の細枝に接種したクビアカツヤカミキリ 孵化幼虫の発育

北島 博<sup>1</sup>

## 1. はじめに

クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii* は中国大陸原産のカミキリムシで、中国、朝鮮半島、ロシアに分布し、中国では南は雲南、広東省、北は内モンゴルまで南北に広く分布している（加賀谷、2015）。我が国では愛知県で2012年に確認されて以来、埼玉県、群馬県、東京都などに新たな侵入・被害地が発見されている（加納ら 2014；桐山ら 2015；須田・村田 2017）。安岡（2017）は、本種の寄主や我が国における被害状況についてまとめている。それによれば、我が国においてこれまでに被害が確認された樹種として、モモ *Prunus persica*、スモモ *P. salicina*、ウメ *P. mume*、サクラ（ソメイヨシノ） *Cerasus × yedoensis* が知られている。一方、我が国では本種幼虫の寄生は報告されていないものの、文献上ではアンズ *P. armeniaca*、ナシ属 *Pyrus*、カキノキ *Diospyros kaki*、ヤナギ属 *Salix*、コナラ属 *Quercus*、クワ属 *Morus*、等も寄主とされている（胡ら 2007）。このように、本種は多様な樹種を寄主とする。バラ科であるリンゴ、ナシへの加害は果樹生産への脅威があり（上地 2015）、我が国の山野には、ヤマザクラ *C. jamasakura* などの自生のサクラ類のほか、ヤナギ属、コナラ属も多数存在する。これらの樹種の、クビアカツヤカミキリの寄主としての適性を解明することは、本種のリスク管理に重要である。このため、15科24種の樹木の細かい切り枝（以下 細枝と表記する）に本種孵化幼虫を接種し、幼虫の発育を樹種間で比較した。

一次性樹皮下穿孔性昆虫の場合、針葉樹ならば樹脂滲出、広葉樹ならば樹液滲出とカルス形成といった抵抗を受け、この抵抗は宿主樹が強健な場合や水分ストレスがない場合に発揮される（岩田 2015）。ユーカリの害虫である *Phoracantha semipunctata*（カ

ミキリムシ科）では、内樹皮の高い含水率がこの虫害に対する対抗手段となっており、水分ストレスの加えられた木は含水率が足りず、容易に加害されるという（岩田 2015）。このことから、樹皮が厚く、健全であると、穿孔性害虫に対する抵抗も強くなることが考えられる。このため、樹皮の厚さの異なるソメイヨシノの切枝に孵化幼虫を接種して、幼虫発育を調べた。

## 2. 材料と方法

### (1) 供試虫

群馬県館林市および邑楽町で、2017年7月にクビアカツヤカミキリ成虫を採集した。直ちに森林総合研究所（茨城県つくば市）に持ち帰り、ABS非帯電角型ケース（18×9×高さ4.5cm）に雌雄ペアあるいは単独で入れ、餌として昆虫ゼリー（株式会社マルカン、サムライフラット55）を与えて、20℃～25℃、16時間明8時間暗（以下 LD16:8と表記する）条件下で飼育した。採卵場所として、半分に折ったJKワイパーを同じ方向にもう一度半分に折り、その状態で5等分したもの（約5.5×4.5cm）の上に、円盤状に切ったソメイヨシノ枝（直径約2cm×高さ約1cm）を置いたものを入れた。卵はJKワイパーと飼育容器の間、折りたたんだJKワイパーの間、JKワイパーと円盤状の枝の間、および円盤状の枝の表面等に産下された。これらの卵を収集し、JKワイパーあるいは円盤状の枝ごとガラスシャーレ（内径6×高さ2cm）に入れ、16℃～20℃ LD16:8条件下に保存した後、孵化した幼虫を供試した。

### (2) 細枝による幼虫の飼育

森林総合研究所構内および同所第2樹木園（ともに茨城県つくば市）において、2017年7月21日～7

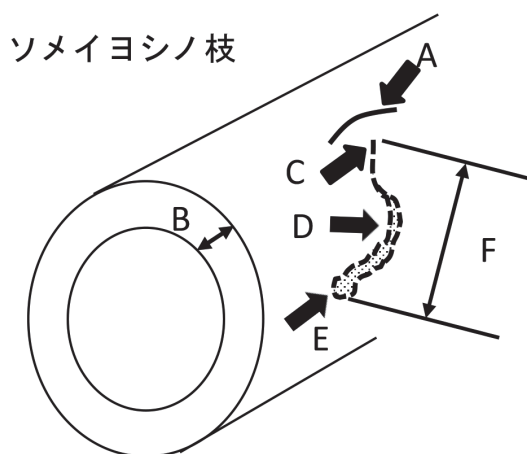


図-1 ソメイヨシノの枝における樹皮厚と接種部位から木部到達部位までの水平距離の測定位置を示した模式図  
 A：カッターナイフによる切れ込み，B：樹皮厚測定部位，C：孵化幼虫接種部位，D：樹皮内に形成された幼虫坑道，E：幼虫が木部に到達した部位または樹皮内で死亡していた部位，F：孵化幼虫接種部位から木部到達部位までの水平距離。

表-1 各種樹木の細枝（長さ18cm）に接種したクビアカツヤカミキリ孵化幼虫の発育結果

科	種	飼育用細枝 供試細枝 数	中央径(mm) 平均値±SD	形成層 穿孔数	接種後30日目の幼虫発育		
					生存数	体重(mg) 平均値±SE 最大値-最小値	
イチョウ	イチョウ <i>Ginkgo biloba</i>	10	12.8 ± 3.8	3	0	-	-
ヒノキ	ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	10	14.5 ± 3.2	7	1	0.7	-
モクレン	ホオノキ <i>Magnolia obovata</i>	10	17.0 ± 3.1	1	0	-	-
クスノキ	クスノキ <i>Cinnamomum camphora</i>	10	10.8 ± 1.3	9	1	0.8	-
マメ	イヌエンジュ <i>Maackia amurensis</i>	10	14.3 ± 2.9	4	2	1.6 ± 0.0	1.6 - 1.6
	ソメイヨシノ <i>Cerasus×yedoensis</i>	10	11.2 ± 2.4	10	6	13.7 ± 3.5	30.0 - 6.1
	オオヤマザクラ <i>Cerasus sargentii</i>	10	13.3 ± 3.3	10	10	8.2 ± 1.9	24.0 - 2.0
	ビワ <i>Eriobotrya japonica</i>	10	12.7 ± 4.0	5	5	1.5 ± 0.4	2.8 - 0.6
バラ	リンゴ <i>Malus pumila</i>	10	11.8 ± 3.7	6	3	26.9 ± 14.7	55.1 - 5.9
	ウワミズザクラ <i>Padus grayana</i>	10	12.3 ± 3.3	6	5	0.5 ± 0.0	0.5 - 0.5
	ウメ <i>Prunus mume</i>	10	11.4 ± 2.1	8	8	43.9 ± 5.3	69.7 - 19.1
	スモモ <i>Prunus salicina</i>	10	15.1 ± 1.6	8	7	30.4 ± 5.6	56.2 - 16.0
	ナシ <i>Pyrus pyrifolia</i> var. <i>culta</i>	10	9.5 ± 0.7	10	4	15.3 ± 3.0	21.7 - 7.9
ニレ	ケヤキ <i>Zelkova serrata</i>	10	12.1 ± 2.3	10	3	0.5 ± 0.2	0.8 - 0.3
ブナ	シラカシ <i>Quercus myrsinifolia</i>	10	10.8 ± 2.3	6	2	0.4 ± 0.0	0.4 - 0.4
	コナラ <i>Quercus serrata</i>	10	17.9 ± 4.4	7	3	0.9 ± 0.4	1.7 - 0.3
クルミ	サワグルミ <i>Pterocarya rhoifolia</i>	10	12.8 ± 4.0	1	1	4.6	-
ヤナギ	セイヨウハコヤナギ <i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i>	10	15.2 ± 3.3	2	0	-	-
	シダレヤナギ <i>Salix babylonica</i>	10	13.7 ± 3.0	7	6	5.7 ± 0.8	8.7 - 3.8
	イロハモミジ <i>Acer palmatum</i>	10	12.8 ± 2.5	6	4	1.3 ± 0.3	2.0 - 0.6
ムクロジ	トウカエデ <i>Acer buergerianum</i>	10	11.1 ± 3.1	2	0	-	-
	トチノキ <i>Aesculus turbinata</i>	10	13.3 ± 3.8	9	6	0.9 ± 0.2	1.3 - 0.2
アオイ	アオギリ <i>Firmiana simplex</i>	10	16.6 ± 3.1	1	0	-	-
ミズキ	ハナミズキ <i>Cornus florida</i>	10	11.1 ± 2.1	8	6	0.7 ± 0.1	1.0 - 0.3
カキノキ	カキノキ <i>Diospyros kaki</i>	10	12.3 ± 3.1	8	6	0.8 ± 0.2	1.6 - 0.4
モクセイ	キンモクセイ <i>Osmanthus fragrans</i> var. <i>aurantiacus</i>	10	12.8 ± 3.5	7	3	0.3 ± 0.0	0.3 - 0.3



月30日にかけて、イチョウ *Ginkgo biloba*, ヒノキ *Chamaecyparis obtusa*, ホオノキ *Magnolia obovata*, クスノキ *Cinnamomum camphora*, イヌエンジュ *Maackia amurensis*, ソメイヨシノ *Cerasus yedoensis*, オオヤマザクラ *Cerasus sargentii*, ビワ *Eriobotrya japonica*, ウワミズザクラ *Padus grayana*, ウメ *Prunus mume*, ケヤキ *Zelkova serrata*, シラカシ *Quercus myrsinifolia*, コナラ *Quercus serrata*, サワグルミ *Pterocarya rhoifolia*, セイヨウハコヤナギ *Populus nigra* var. *italica*, シダレヤナギ *Salix babylonica*, イロハモミジ *Acer palmatum*, トウカエデ *Acer buergerianum*, トチノキ *Aesculus turbinata*, アオギリ *Firmiana simplex*, ハナミズキ *Cornus florida*, キンモクセイ *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus* の枝を採取した。農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門（茨城県つくば市）において、同年7月27日～8月3日に、スモモ *Prunus salicina*, ナシ *Pyrus pyrifolia* var. *culta* の枝を採取した。茨城県内のホームセンターで、同年8月3日に、リンゴ *Malus pumila* (ふじ) とカキノキ *Diospyros kaki* (富有) の高さ約1.2mの苗木を購入した。これらの枝から長さ18cmに切りそろえた細枝を各樹種10本ずつ作成し、孵化幼虫を接種するまでポリ袋に入れて5℃条件下で保存した。孵化幼虫接種前に、細枝中央部の直径をノギスで測定した。

細枝の中央部の樹皮に、カッターナイフを用いて木部に達しない切れ込みを入れ、そこに孵化幼虫を落とし込んで接種した。接種を2017年7月22日～8月4日にかけて、温度調節のない室内で行い、1日間そのまま静置した後、細枝の乾燥を防ぐためにスチロール角型ケース (30×22.5×高さ6 cm) に入れて、25℃ LD16:8 条件下に移した。

孵化幼虫接種後30日目に細枝の樹皮を剥皮し、木部に到達した幼虫数、および生存幼虫数を計数し、生存幼虫の体重を測定した。孵化幼虫の平均体重を0.32mgとして (浦野・加賀谷 2017)、体重の増加割合を求めた。

### (3) 樹皮の厚さが幼虫の穿孔様相へ与える影響

樹皮の厚さの異なるソメイヨシノの枝として、長

さ18cmで中央径2.3～5.2cm、および長さ37cmで中央径8.3cmの2種類の枝を準備した。枝の両木口面において、孵化幼虫を接種する面の樹皮の厚さをノギスで測定し (図-1, B), これらの平均値を樹皮厚とした。長さ18cmの枝には1個体ずつ、長さ37cmの枝には6個体の孵化幼虫を上述の方法で接種し、25℃, LD16:8で孵化幼虫接種後30日目まで飼育した。孵化幼虫接種後31日目から39日目にかけて、樹皮を剥皮しながら、接種部位からの穿孔様相、木部までの穿孔の有無、木部へ到達した部位、幼虫が死亡した部位を観察し、接種部位から木部へ到達した部位または幼虫が死亡した部位までの水平距離 (図-1, F) をノギスで測定した。

## 3. 結果

### (1) 樹種と幼虫発育との関係

表-1に、各樹種細枝の中央径、木部まで到達した幼虫数、生存数、および生存幼虫の平均体重を示した。細枝中央径の平均値は樹種によって異なり、9.5～17.9mmであった。木部まで到達した幼虫は、すべての樹種で1個体以上が認められた。本種の主要な寄主であるバラ科においては5～10個体と多かったが、その他の樹種でも、ヒノキ、クスノキ、ケヤキ、シラカシ、コナラ、シダレヤナギ、イロハモミジ、トチノキ、ハナミズキ、カキノキ、キンモクセイにおいて6～10個体が木部まで到達していた。

一方、接種後30日目の生存数は、バラ科においても3～10個体と樹種によりバラツキが見られた。その他の樹種では、シダレヤナギ、イロハモミジ、トチノキ、ハナミズキ、カキノキ、キンモクセイにおいて3～6個体が生存していた。幼虫が全く生存していなかった樹種は、イチョウ、クスノキ、セイヨウハコヤナギ、トウカエデ、アオギリであった。生存幼虫が見られたが、幼虫の生存率が木部までの到達数の50%以下であった樹種は、バラ科ではリンゴ、ナシであり、その他の樹種ではヒノキ、クスノキ、ケヤキ、シラカシ、コナラ、キンモクセイであった。

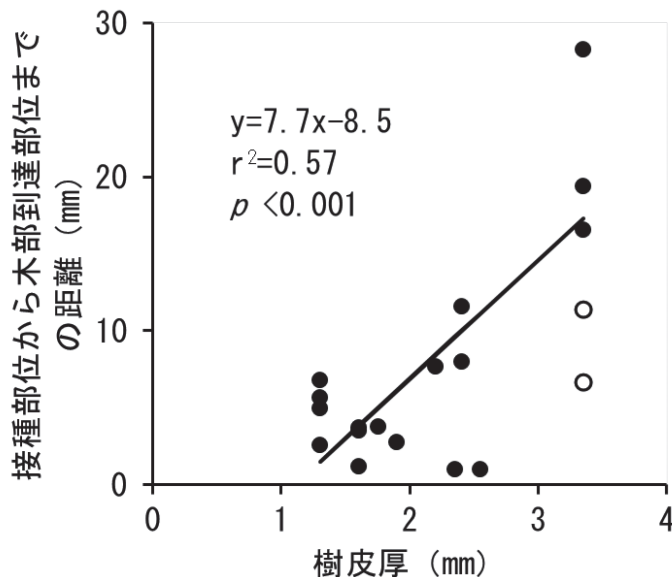


図-2 ソメイヨシノの切枝にクビアカツヤカミキリ孵化幼虫を接種した時の樹皮厚と接種部位から木部到達部位までの水平距離

●：木部へ到達していた幼虫，○：木部へ到達できずに死亡していた幼虫，回帰直線は●の値を用いて計算した。

バラ科において、孵化幼虫に対する生存幼虫の体重増加割合を比較すると、ソメイヨシノでは約42.8倍まで発育していた。ナシでは47.8倍とソメイヨシノと同等であった。リンゴ、ウメ、スモモでは、それぞれ84.1倍、137.2倍、95.0倍と大きく発育しており、ソメイヨシノに比べても約2～3倍発育していた。一方、オオヤマザクラでは孵化幼虫から25.6倍であり、ソメイヨシノの半分程度の発育であった。ビワおよびウワミズザクラでは幼虫の発育はほとんど見られず、孵化幼虫に対してそれぞれ約4.7倍および約1.6倍しか発育していなかった。他の樹種での発育は、サワグルミが孵化幼虫に対して約14.4倍、シダレヤナギが同じく17.8倍と、ビワやウワミズザクラよりも発育していたが、その他の樹種では0.9～5倍とほとんど発育していなかった。

(2) 樹皮の厚さが幼虫の穿孔様相に与える影響

図-2に、ソメイヨシノ切枝の内樹皮に食入していた幼虫について、樹皮の厚さと孵化幼虫接種部位から木部へ到達した部位までの水平距離との関係を示した。接種部位から穿孔していた幼虫19個体のうち17個体が木部まで到達していた。木部へ到達する

までの距離は樹皮が厚いほど長くなり、木部へ到達した幼虫においては、両者の間に有意な相関関係が見られた。樹皮が厚いと、幼虫が不規則に坑道を形成する様子が観察された(写真-1 a)。樹皮厚3.35mmでは、2個体の幼虫が樹皮内で樹液にまかれて死亡していた(写真-1 b)。

4. 考察

今回の実験で、細枝の樹種により、クビアカツヤカミキリ孵化幼虫の発育が異なることがわかった(表-1)。本種の主たる寄主のバラ科のうち、我が国で被害が見られているソメイヨシノ、ウメ、スモモは生存数が多く、幼虫の発育もよかった。一方、ハコヤナギ属*Populus*、コナラ属、カキノキは本種の寄主として知られているが(胡ら 2007; 安岡 2017)、今回の実験ではセイヨウハコヤナギ、シラカシ、コナラ、カキノキでは幼虫は発育しなかった。また、バラ科以外の多くの樹木でも幼虫は発育しなかった。このように幼虫が発育できない樹種は、幼虫の寄主として不適であると考えられた。これらのことから、直径2 cmに満たない細枝での孵化幼虫の

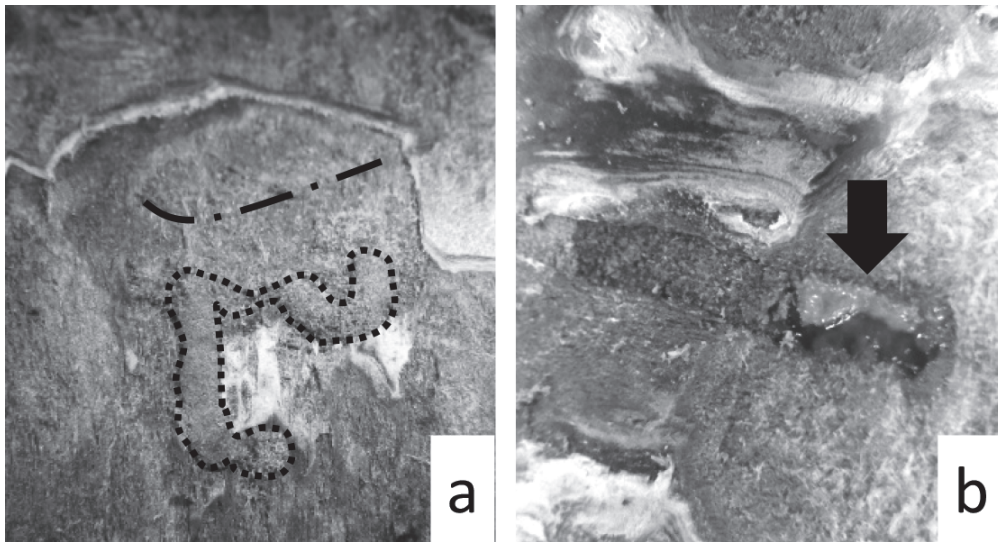


写真-1 ソメイヨシノの切枝に接種したクビアカツヤカミキリ孵化幼虫の坑道 (a) および樹液にまかれて死亡した幼虫 (b, 矢印)

写真 a の一点鎖線は孵化幼虫接種時のカッターによる切れ込みの先端部分、点線内は外樹皮下に認められた坑道と詰められたフラスを示す。

飼育によって、本種の寄主をある程度判別できるのではないかと考えられた。

バラ科であるナシ、リンゴは、我が国での被害は見られていないが、今回の実験では幼虫がよく発育した (表-1)。リンゴに加え、ウメ、スモモもソメイヨシノに対して約2~3倍程度幼虫が発育した (表-1)。ウメ、スモモと同じスモモ属 *Prunus* に属するモモは、我が国でも激しい被害を受けている (中野・渡邊 2017)。これらのことから、ナシ、リンゴ、およびスモモ属であるスモモ、モモ、さらには同じスモモ属のアンズやユスラウメなども、本種の分布拡大リスクを考える上で注視すべき樹種になると考えられた。

バラ科でも、ビワやウワミズザクラでは生存幼虫が見られたものの幼虫はほとんど発育しておらず、オオヤマザクラでもソメイヨシノの半分程度しか発育していなかった (表-1)。また、ヤナギ科でも、シダレヤナギでは幼虫発育が見られたが、セイヨウハコヤナギでは生存幼虫がいなかった (表-1)。さらに、サワグルミではシダレヤナギと同程度に幼虫が発育した (表-1)。シダレヤナギやサワグルミにおける成虫までの発育の可否については、今後

の調査が必要である。しかし、これらのことは、バラ科、ヤナギ科のように寄主としての知見の有無に関わらず、樹種ごとに幼虫発育の可否を解明することが必要であることを示唆する。

ソメイヨシノの枝では、樹皮が厚いと木部への到達までの距離が延びたり (図-2)、樹液によって幼虫が死亡したりすることが示された (写真-1 b)。このことは、樹皮に幼虫の穿孔に抵抗する何かが存在しており、樹液は他の一次性カミキリムシにおけるように、その1つであることを示唆する (小島 1929; Hay 1974; Hanks *et al.* 1991, 1999)。厚い樹皮の場合に孵化幼虫が不規則に孔道を形成するのも (写真-1 a)、幼虫が樹液の滲出に対処している行動かもしれない。樹液の滲出による抵抗は、樹木が健全であるほど強く発揮されることが考えられる。このため、本種の寄主の適性を判断するためには、今回のような細枝による発育可能性の検証に加え、生立木での検証も必要になると考えられた。

我が国の果樹の被害としては、これまでリンゴ、ナシは顕在化していないが、今回の実験では両樹種とも幼虫の発育が良かった (表-1)。また、我が国の山野にはヤマザクラなど多くのバラ科が自生す



るが、同属のオオヤマザクラでも幼虫は発育できた(表-1)。これらの樹種における被害が顕在化していないのは、たまたま本種がこれらの樹種に遭遇していないこと、生存木では幼虫の食入に対する抵抗性が強いこと、産卵対象として好適でないことなどが考えられる。バラ科における幼虫の食入に対する抵抗性機構については、樹液の生産と滲出に関する木材組織学および樹木生理学的な解明が、産卵対象の選択機構については、雌成虫の誘引・忌避に関する化学生態学的な解明が望まれる。これらの研究とあわせて、我が国自生の樹木のクビアカツヤカミキリの寄主としての適性解明を進めながら、分布拡大阻止と根絶に向けた体制を整えていく必要がある。

## 謝辞

本研究には、森林総合研究所樹木園を利用した。同樹木園での細枝の採取にあたり、同所実験林室の川崎達郎氏、荒井和則氏、根本和也氏に協力いただいた。スモモ、ナシの細枝の入手では、農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門上地奈美氏に協力いただいた。本研究は、(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号201702)の研究成果である。

## 引用文献

Hanks LM, Paine, TD, Millar JG (1991) Mechanisms of resistance in *Eucalyptus* against larvae of the eucalyptus longhorned borer (Coleoptera: Cerambycidae). *Environ Entomol* 20: 1583 ~ 1588  
Hanks LM, Paine TD, Millar JG, Campbell CD, Schuch UK (1999) Water relations of host trees and resistance to the phloem-boring beetle *Phoracantha semipunctata* F. (Coleoptera: Cerambycidae). *Oecologia* 119: 400 ~ 407  
Hay CJ (1974) Survival and mortality of red oak borer larvae on black, scarlet, and northern red oak in eastern Kentucky. *Ann Entomol Soc Am*

67: 981 ~ 986

- 岩田隆太郎 (2015) 木質昆虫学序説. 九州大学出版会, 福岡  
加賀谷悦子 (2015) 侵入害虫クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii* とサクラの被害. *樹木医学研究* 19: 37 ~ 40  
加納正行・野中俊文・桐山 哲・岩田隆太郎 (2014) 埼玉県草加市の‘染井吉野’におけるカミキリムシ外来種クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii* の発生と被害. *森林防疫* 63: 101 ~ 105  
桐山 哲・岩田隆太郎・加賀谷悦子 (2015) 群馬県館林市・東京都福生市で発生が確認されたサクラ・ウメ等を加害する外来種クビアカツヤカミキリ. *植物防疫* 69: 807 ~ 809, 口絵  
小島俊文 (1929) シロスデカミキリの習性. *応用動物学雑誌* 1: 43 ~ 45  
胡 長効・丁 永輝・孫 科 (2007) 国内桃紅頸天牛研究進展. *農業与技術* 27(1): 63 ~ 67  
中野昭雄・渡邊崇人 (2017) 徳島県内のモモ産地におけるクビアカツヤカミキリによる被害状況とこれまで試行した防除法. *植物防疫* 7: 723 ~ 728, 口絵  
須田 亨・村田元彦 (2017) 群馬県におけるクビアカツヤカミキリ(クロジャコウカミキリ)の分布拡大. *森林防疫* 66: 5 ~ 9  
上地奈美 (2015) クビアカツヤカミキリ (*Aromia bungii*) の果樹害虫化の可能性. *果実日本* 70(8): 47 ~ 50  
浦野忠久・加賀谷悦子 (2017) クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii* (コウチュウ目: カミキリムシ科) 飼育個体の寿命と生涯産卵数. *関東森林研究* 68(1): 25 ~ 28  
安岡拓郎 (2017) クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii* (Faldermann) 幼虫に対する薬剤の防除効果. *植防研報* 53: 51 ~ 62  
(2018.1.11受付, 2018. 2.10掲載決定)

## 論文

# 東・東南アジアで採取された*Raffaelea quercivora* 類縁菌 6 菌株のミズナラに対する病原性

鳥居正人<sup>1</sup>・山田利博<sup>2</sup>・SEO, Sang-Tae<sup>3</sup>・THU, Pham Quang<sup>4</sup>  
WU, Meng-Ling<sup>5</sup>・BURANAPANICHPAN, Sawai<sup>6</sup>・中島千晴<sup>7</sup>  
松田陽介<sup>8</sup>・伊藤進一郎<sup>9</sup>

## 1. はじめに

*Raffaelea*属菌は養菌性キクイムシと密接な関係をもち (Harrington *et al.* 2008; 升屋・山岡 2009), 近年それらによる樹木の枯死被害が世界的に発生している。日本では病原菌*Raffaelea quercivora*とそれを伝搬するカシノナガキクイムシ (*Platypus quercivorus*) によるブナ科樹木の萎凋病 (以下 ナラ枯れ) が (伊藤ら 1998; Kubono and Ito 2002), 韓国では*R. quercus-mongolicae*と*P. koryoensis*が関与するとされるナラ類の集団枯死被害 (Korean oak wilt) が (Kim *et al.* 2009; Torii *et al.* 2014), 北米では病原菌*R. lauricola*とハギキクイムシ (*Xyleborus glabratus*) によるクスノキ科樹木の枯死被害 (laurel wilt) が報告されている (Fraedrich *et al.* 2008; Harrington *et al.* 2008)。それぞれの被害はその国以外での被害報告はないが, *R. quercivora*は, 日本以外に台湾やベトナム, タイ, インドネシアで (Kusumoto *et al.* 2014), *R. lauricola*は北米以外に日本や台湾で見ついている (Harrington *et al.* 2011)。さらに, 病原性は確認されていないが, 近年になり世界的に本属菌の新種記載が行われている (Musvuugwa *et al.* 2015; Simmons *et al.* 2016)。以上のように, 近年次々に*Raffaelea*属菌の新種同定や新たな分布域の発見がなされていることから, 東・東南アジアにおいてもいまだ本属菌の未記載種が存在する, あるいは既知種であっても現在知られている以上に広い地域に分布している可能性が考えられる。

穿孔性昆虫, とくにキクイムシ類 (キクイムシ亜科, ナガキクイムシ亜科) とそれに関わる菌類による樹木の枯損被害は世界的に多発しており, その多くが木材および梱包材の輸出入に伴って, 他国から昆虫あるいは菌類が新たに侵入して発生する侵入病害であると示唆されている (Hulcr and Dunn 2011; Ploetz *et al.* 2013)。実際に, 北米で*R. lauricola*を伝搬するハギキクイムシはアジア原産であり, 日本と台湾で採取された本甲虫からも*R. lauricola*が検出されたことから, 北米での本菌による被害はアジアからの侵入病害であることが示唆された (Harrington *et al.* 2011)。一方で, ナラ枯れでは, 江戸時代に同様の被害が起こっていたことを示す古文書が見つかっており (井田・高橋 2010), 古くから*R. quercivora*とカシノナガキクイムシは日本国内に分布していた可能性が高い。以上のように, *Raffaelea*属菌による被害では侵入病害であると示唆されるものもあり, 被害発生地域外におけるキクイムシ類とそれに関わる菌類の情報の集積は, 今後発生する類似の被害を未然に防ぐために重要である (升屋・山岡 2012)。

上記のような視点から, 我々は日本を除く東・東南アジア 4 か国のブナ科林分において*Raffaelea*属菌のインベントリー調査を行った。その結果, 菌叢形態が*R. quercivora*に類似した菌株が複数採取された。キクイムシ類とそれに関わる菌類による侵入病害が世界的に多発していることを踏まえ, 本研究では, 日本を除く東・東南アジア産の*R. quercivora*

Pathogenicity of six isolates of *Raffaelea quercivora* and/or its allied fungi collected from East and Southeast Asia to *Quercus crispula*

<sup>1</sup>TORII, Masato, 東京大学大学院農学生命科学研究科田無演習林; <sup>2</sup>YAMADA, Toshihiro, 東京大学大学院農学生命科学研究科秩父演習林;

<sup>3</sup>Korean Forest Research Institute, Korea; <sup>4</sup>Forest Science Institute of Vietnam, Vietnam;

<sup>5</sup>Taiwan Forestry Research Institute, Taiwan; <sup>6</sup>Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Thailand;

<sup>7</sup>NAKASHIMA, Chiharu, 三重大学大学院生物資源学研究所; <sup>8</sup>MATSUDA, Yosuke, 三重大学大学院生物資源学研究所;

<sup>9</sup>ITO, Shin-ichiro, 三重大学

類似菌が日本国内に侵入した場合の病害リスク評価を行うための基礎的知見として、これら菌株のミズナラに対する病原性を評価することを目的とした。日本と韓国、北米における本属菌による樹木の萎凋枯死は、感染後の樹幹部における通水機能の停止によって引き起こされる（黒田・山田 1996; Murata *et al.* 2005; Inch and Ploetz 2012; Torii *et al.* 2014）。そのため、採取された菌株を接種し、葉の萎凋や褐変といった外部病徴と樹幹部の通水阻害や材変色といった内部病徴をもとに、その病原性を評価した。菌株は、主にブナ科の常緑性コナラ属やシイ属、マテバシ属が優占する林分において、それらの樹幹に穿孔した甲虫の孔道から得られた。また、侵入病害が深刻化する要素のひとつとして、侵入した病原体と在来の宿主植物は、本来の分布域の違いから共進化関係が欠落しており、植物の病原体に対する抵抗性が低いことが考えられている（Ploetz *et al.* 2013）。このことから、ブナ科樹木の中でも日本全国と韓国、中国の一部にのみに分布するミズナラ（Menitsky 2005）は、東・東南アジア産のこれら *R. quercivora* 類似菌が国内に侵入した際に被害発生リスクが高いと考えられ、接種試験に用いることにした。

## 2. 材料と方法

### (1) 供試菌株

東・東南アジアの韓国、台湾、ベトナム、タイの4か国で採取された *R. quercivora* 類似菌6菌株を供試した。RK49は韓国、RTa3は台湾、RV1はベトナム、RTH6, 74, 136はタイで採取された菌株である。韓国ではナラ類の集団枯死被害発生地で、それ以外の国では常緑性コナラ属やシイ属、マテバシ属が優占する林分で、それらブナ科樹木に穿孔した甲虫の孔道から菌株を得た。各国での菌株採取については、採取の了承あるいは当該機関の許可を得て実施し、国内への持ち込みに関しては植物防疫所の許可を得た。

6菌株の分類学的所属と系統関係を解明するために核DNA塩基配列を用いた分子系統解析を行った。それぞれの菌糸体からDNeasy Plant Mini Kit (Qiagen)

を用いて全DNA抽出を行い、NL1とNL4のプライマーセット（O'Donnell 1993）を用いて、28S rDNA（D1/D2）領域部分塩基配列をAndo *et al.* (2016) の条件にてPCR法による増幅を行った。PCR産物はillustra ExoProStar（GE Healthcare）で精製後、BigDye Terminator v. 3.1 Cycle Sequencing Kit（Applied Biosystems）を用いてダイレクトシーケンスを行い、塩基配列を取得した。取得した塩基配列は、アセンブルののち、DDBJ/EMBL/GenBankデータベースに登録されている *R. quercivora* RA2245株と *Raffaelea* 属の既知種、系統解析の外群として用いた *Ceratocystiopsis* 属菌2種の塩基配列と合わせて、MAFFT v. 7（G-INS-i option）（Katoh *et al.* 2017）によりアライメントを行った。その後、MEGA7（Kumar *et al.* 2016）を用いて最尤系統樹を作成した。本研究により新たに取得した6菌株の塩基配列はDDBJ/EMBL/GenBankデータベースに登録した（accession no. LC339482-339487）。6菌株の分類学的所属については現在も検討中だが、系統解析により、これらはそれぞれ *R. quercivora* と *R. quercus-mongolicae*, *R. montetyi* に近縁であると推定された2菌株（RV1とRTH136）、1菌株（RK49）、1菌株（RTH74）と、既知種と明確に区別された2菌株（RTH6とRTa3）に分けられた（図-1）。本研究では、これら6菌株を以後の試験に供試するとともに、通水阻害や材変色を引き起こす能力の程度を病原力とし、それら菌株の病原力と比較するため、国内の被害発生地で採取した *R. quercivora* RA2245株（Torii *et al.* 2016, 図-1）を供試した。

### (2) 接種試験

接種試験は、植物防疫所の許可のもと、三重大学に設置した人工気象室（25-28℃、明暗16/8時間、LPH-1.9P-S、日本医化器械製作所）内で行った。接種試験に用いたミズナラの苗木は、約5年生で、樹高と根元直径（平均値±標準偏差、n=191）はそれぞれ104±15cm、12.6±1.9mmであった。人工気象室内で1か月以上育苗したものを接種試験に供試した。

ナラ枯れでは、カシノナガキクイムシの大量穿孔（マスアタック）が発生することから、病原菌によ



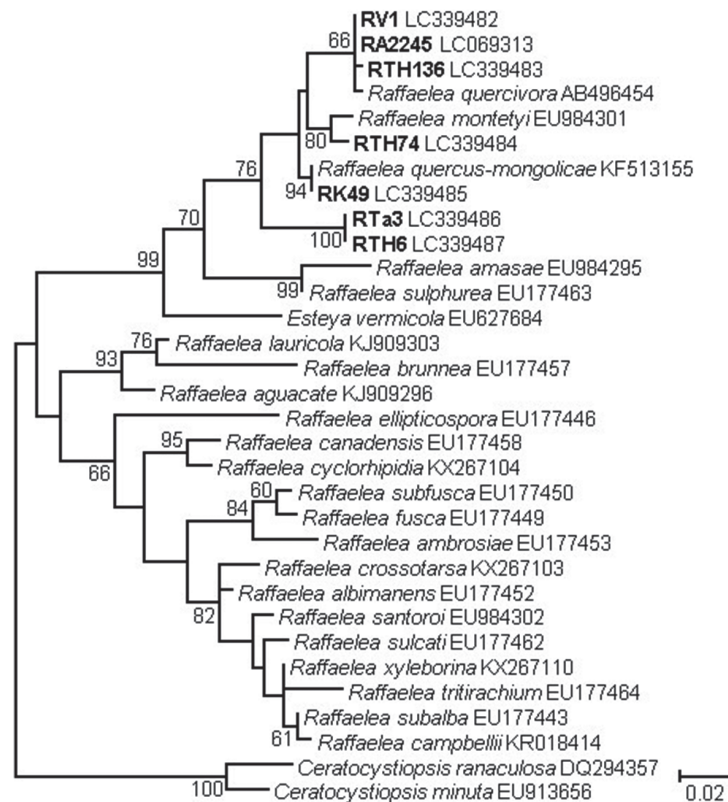


図-1 *Raffaelea*属既知種と供試菌株の28S rDNA (D1/D2) 領域に基づいて推定された最尤法による系統樹  
 太字で供試菌株を示し、RVはベトナム、RAは国内、RTHはタイ、RKは韓国、RTaは台湾で採取された菌株である。  
 各菌株と各種名の後ろに、DDBJ/EMBL/GenBankデータベースにおけるaccession no.を示した。60%以上のブ  
 ートストラップ値（1000反復）を枝上に示した。

る枯死を再現するために、それを模した高密度での多点接種が行われてきた（伊藤ら 1998; Murata *et al.* 2005）。そこで、本研究においても多点接種を行うとともに、通水障害や材変色の程度を評価するために1点接種を行った。本研究では3回の接種試験を行い、それぞれの試験で多点と1点接種の両接種あるいは1点接種のみを行った。接種源として、1/2濃度のポテトデキストロース寒天培地上で、各菌株と25℃暗条件下で1週間共培養した爪楊枝の先端部（長さ3.5mm）を用いた。多点接種では、ハンドドリルを用いて、苗木の幹直径8mmの部位とそこから軸方向に上下5mmの部位に、4箇所ずつ直径1.4mm、深さ3.5mmの接種孔を計12点あけた。その後、各接種孔に接種源を埋め込み、接種孔の上から幹全周にわたりパラフィルムを、次いでその上から布製ガムテープを巻いた。対照として滅菌した爪楊枝を

用いた。1点接種においては、苗木の幹直径8mmの部位にあけた接種孔1箇所を上記と同様に接種を行った。

3回の接種試験のうち、1回目の接種試験ではRTH74とRA2245を供試し、多点接種では各菌株接種用と対照木として20本ずつ、1点接種では各菌株接種用と対照木として7本ずつを供試した。2回目と3回目の接種試験では1点接種のみを行い、2回目の接種試験ではRTH6、74、136とRA2245の接種用に15本と対照木として15本を供試した。3回目の接種試験ではRV1、RTH74、RK49、RTa3とRA2245の各菌株接種用に6本と対照木として5本を供試した。

### (3) 病原性と病原力の評価

いずれの接種試験においても、3-4日おきに病徴観察を行い、Murata *et al.* (2005) の基準により

接種点よりも上部の全ての葉が萎凋・褐変した苗木を枯死と判定した。枯死と判定した苗木はその日のうちに、枯死しなかった苗木は、多点接種では接種1か月後に、1点接種では接種2週間後に地際部より上部を回収した。1点接種では、回収した苗木の地際部を1%酸性フクシン水溶液に12時間以上浸漬させた。その後、接種部横断面の写真を撮影した。酸性フクシン水溶液によって染色されなかった部分を非通水域とし、撮影した写真を用いてプランメーター (PLANIX 6, タマヤ計測システム) により接種孔を除く横断面全面と非通水域の面積を計測し、接種部横断面に占める非通水域の割合を算出した (Murata *et al.* 2007)。さらに、非通水域の計測を行った一部の苗木においては、接種孔から軸方向の上下に形成された材変色の長さを測定し、その平均値を材変色長として算出した。

また、接種後に回収したすべての苗木から接種菌の再分離を行った。接種部付近の材変色部から数mmの材片を作成し、70%エタノールに数秒、1%次亜塩素酸ナトリウム水溶液に3分間浸漬し、表面殺菌を行った。その後、各材片は滅菌水中で2回洗浄し、1/2濃度のポテトデキストロース寒天培地上に静置

した。25°C暗条件下で1週間培養を行い、分離された菌叢形態から接種菌株の再分離の有無を判別した。

#### (4) 統計解析

多点接種における対照木と各菌株接種木の枯死率の対比較にはFisherの正確確率検定を用いた。また、3回行ったいずれの1点接種においても、非通水域の割合と材変色長はMann-Whitney *U*検定を用いて、対照木と各菌株接種木の対比較を行った。いずれの統計も有意水準は5%とした。すべての統計解析はR v. 3.4.1. (R Development Core Team 2017) で行った。

### 3. 結果と考察

東・東南アジアの4か国で採取された*R. quercivora*類似菌6菌株をミズナラに接種したところ、各菌株の接種木の43–100%で接種菌が再分離された (図-2, 3, 4)。このことから、本研究で供試した外国産菌株はいずれもミズナラに定着可能であることが示唆された。接種菌が再分離されなかった接種木は以後の解析から除外した。また、すべての接種試験において対照木から*R. quercivora*やその類似菌は分離されなかった。

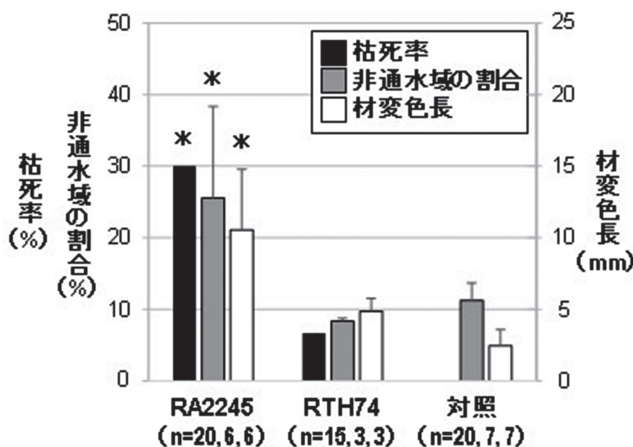


図-2 多点と1点接種 (1回目) における苗木の枯死率と接種部横断面での非通水域の割合、接種孔からの材変色長  
 枯死率 (n=20) は多点接種、非通水域の割合 (n= 7) と材変色長 (n= 7) は1点接種において算出した。接種菌株が再分離されなかった苗木はデータから除外したため、実際の計測に用いた供試数nを供試菌株の下に、枯死率、非通水域の割合、材変色長の順に示した。多点接種では、各菌株で供試した接種木のうちの75–100%で再分離が確認された。1点接種では43–86%の接種木から再分離が確認された。非通水域の割合と材変色長の値は平均値±標準偏差で示した。アスタリスクは対照木との間に有意差があったことを示す (枯死率; Fisherの正確確率検定, 非通水域の割合と材変色長; Mann-Whitney *U*検定, いずれも $p < 0.05$ )。

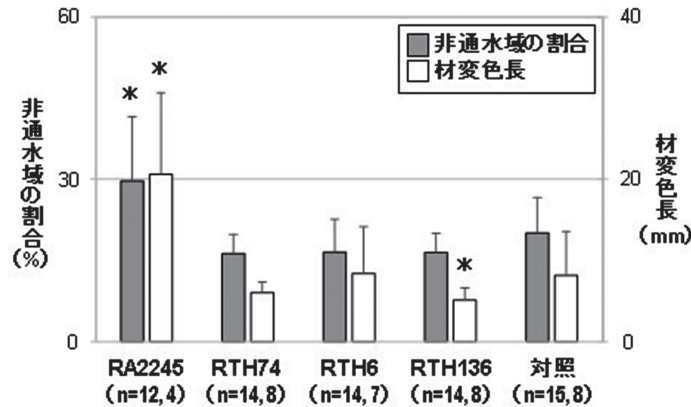


図-3 1点接種（2回目）における接種部横断面での非通水域の割合と接種孔からの材変色長

非通水域の割合と材変色長の測定にはそれぞれ苗木15本と8本を供試したが、接種菌株が再分離されなかった苗木はデータから除外したため、実際の計測に用いた供試数nを供試菌株の下に、非通水域の割合、材変色長の順に示した。各菌株で非通水域の計測に用いた接種木のうちの80-93%で再分離が確認され、材変色の計測に用いた接種木では50-100%で再分離が確認された。それぞれの値は平均値 ± 標準偏差で示した。アスタリスクは対照木との間に有意差があったことを示す(Mann-Whitney U検定,  $p < 0.05$ )。

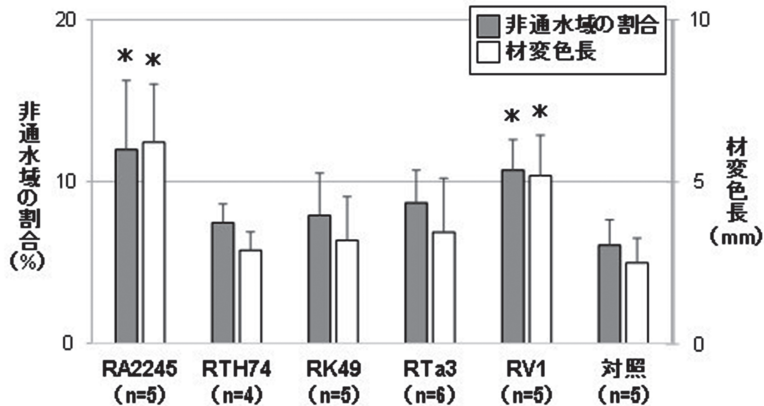


図-4 1点接種（3回目）における接種部横断面での非通水域の割合と接種孔からの材変色長

いずれの計測においても各菌株接種木で6本を供試したが、接種菌株が再分離されなかった苗木はデータから除外したため、実際の計測に用いた供試数nを供試菌株の下に示した。各菌株で供試した接種木のうちの67-100%で再分離が確認された。それぞれの値は平均値 ± 標準偏差で示した。アスタリスクは対照木との間に有意差があったことを示す (Mann-Whitney U検定,  $p < 0.05$ )。

すべての接種試験において、1点接種では萎凋、枯死は観察されず、多点接種において、RTH74株接種区で1本、比較のために用いたナラ枯れの病原菌*R. quercivora* RA2245株接種区で6本の枯死が確認された。対照木では枯死は確認されなかった。対照木に比べ、RA2245株接種区の枯死率は有意に大きかったが、RTH74株接種区では有意差は認められなかった(図-2)。また、RA2245株接種区では3回の1点接種のいずれにおいても非通水域の割合

と材変色長は対照木に比べ、有意に大きかった(図-2, 3, 4)。それに対して、RTH74株接種区では3回のすべての1点接種で、その非通水域の割合と材変色長において対照木との間に有意差は認められなかった。以上のことから、RTH74株の接種により1個体が枯死したものの、RTH74株がミズナラに対して病原性を示す可能性は低いと考えられた。また、2回目の1点接種ではRTH136株接種区の材変色長は対照木に比べ、有意に小さかった(図-3)。



さらに、3回目の1点接種ではRV1株接種区の非通水域の割合と材変色長は対照木よりも有意に大きく、RA2245株接種区と同程度であった。このようにRTH136株、RV1株とRA2245株以外に対照木と有意差が認められる菌株はなかった。RTH136株の接種による材変色長が小さくなった理由は不明であるが、以上のことから、本研究で今回供試した菌株はミズナラに対する病原性を有していない、あるいは国内の被害に関わる*R. quercivora*の病原力と同程度であることが示唆された。

分子系統解析において、供試菌株のなかで病原力が比較的強いRV1株は*R. quercivora*とともに一つのクレードを形成したが、そのクレードには病原力が比較的弱いRTH136株も含まれた(図-1)。これらが*R. quercivora*と同種であるか詳細に検討する必要があるが、その種内で病原力に変異があることが知られている。Kusumoto *et al.* (2014) は接種試験により外国産*R. quercivora*菌株間で病原力に差異があることを示した。さらに、国内に分布する*R. quercivora*菌株間においても病原力に差異があることが報告されている(Kusumoto *et al.* 2012; Torii *et al.* 2016)。つまり、種内や本研究の分子系統解析により同じクレードに含まれた同一系統内でも菌株によってその病原力に差異があると考えられる。本研究では、同一のクレードに含まれるものとして多くとも2菌株しか供試できておらず、同一系統内における病原力の差異を十分に反映した病害発生リスク評価を行えてはいない。そのため、病害発生リスク評価を行っていく上では、今後同一系統内における病原力の差異を考慮する必要がある。近年、*R. quercivora* (Masuya *et al.* 2016) や韓国の被害に関わる*R. quercus-mongolicae* (Jeon *et al.* 2017) のゲノム情報が公開された。これらの情報を用いた*Raffaelea*属菌の病原性関連遺伝子や宿主樹木との相互作用の解明が進めば、分子生物学的アプローチによる病害発生リスク評価も可能になり、接種試験よりも効率的な病原性や病原力の判定が可能になるかもしれない。

日本と韓国、北米で*Raffaelea*属菌に関わる樹木の

枯死被害が発生しているが、被害に関わる*Raffaelea*属菌の樹体内における分散様式は異なり、被害の発生機構も異なることが知られている。日本でのナラ枯れに関与する*R. quercivora*の樹体内における分散と材変色や非通水域の形成は、本菌の接種部やカシノナガキクイムシの加害部付近に限定される(Murata *et al.* 2007; Takahashi *et al.* 2010)。そのため、本菌による樹木の萎凋枯死には、カシノナガキクイムシの大量穿孔が必要である(伊藤ら 1998; Takahashi *et al.* 2010)。一方、北米で問題となる*R. lauricola*は樹体内の広範囲に分散できるため(Ploetz *et al.* 2012)、1点接種であっても萎凋・枯死に至ることが確認されており、自然条件下で本菌を運搬するハギクイムシの数頭の加害のみで生立木の枯死が起こり得ると推察されている(Fraedrich *et al.* 2008; Inch and Ploetz 2012)。韓国の被害に関わる*R. quercus-mongolicae*においては、病理学的研究が十分になされていないものの、被害木には*P. koryoensis*による大量穿孔が観察されており(Lee *et al.* 2011)、本菌接種による材変色や非通水域の形成は接種部付近に限定されることから(Torii *et al.* 2014)、その分散様式や被害発生機構は*R. quercivora*と類似すると考えられる。本研究によって、今回、東・東南アジアで採取された*R. quercivora*類似菌はミズナラに対する病原性を有していたとしても、その病原力は国内の被害に関わる*R. quercivora*と同程度かそれ以下であることが示唆された。少なくとも今回供試した菌類によるミズナラに対する被害が起こる際には、伝搬する甲虫の大量穿孔が条件となる。今後はこれら*R. quercivora*類似菌を伝搬する甲虫の行動生態にも着目した研究が必要である。

## 謝辞

タイでの菌株採取についてはNational Research Council of Thailandから調査許可を得て実施し、国内への持ち込みでは植物防疫所から許可(韓国:20名植第394号, 台湾:25名植第144号, ベトナム:23名植第388号, タイ:20名植第816号, 21名植第432号, 21名植第538号)をいただいた。海外での菌株採取

にあたり, Korean Forest Research Institute (韓国), Taiwan Forestry Research Institute (台湾), Forest Science Institute of Vietnam (ベトナム), Faculty of Agriculture, Chiang Mai University (タイ) のそれぞれのスタッフ, 三重大学生物資源学部森林微生物学研究室の皆様にご協力いただいた。本研究の一部はJSPS特別研究員奨励費JP27-8594 (MT) によって行われた。

## 引用文献

- Ando Y, Masuya H, Motohashi K, Linnakoski R, Yamaoka Y (2016) Phylogenetic relationship of Japanese isolates belonging to the *Grossmannia piceiperda* complex (Ophiostomatales). *Mycoscience* 57: 123 ~ 135
- Fraedrich SW, Harrington TC, Rabaglia RJ, Ulyshen MD, Mayfield AE, Hanula JL, Eickwort JM, Miller DR (2008) A fungal symbiont of the redbay ambrosia beetle causes a lethal wilt in redbay and other Lauraceae in the Southeastern United States. *Plant Dis* 92: 215 ~ 224
- Harrington TC, Fraedrich SW, Aghayeva DN (2008) *Raffaelea lauricola*, a new ambrosia beetle symbiont and pathogen on the Lauraceae. *Mycotaxon* 104: 399 ~ 404
- Harrington TC, Yun HY, Lu SS, Goto H, Aghayeva DN, Fraedrich SW (2011) Isolations from the redbay ambrosia beetles, *Xyleborus glabratus*, confirm that the laurel wilt pathogen, *Raffaelea lauricola*, originated in Asia. *Mycologia* 103: 1028 ~ 1036
- Hulcr J, Dunn RR (2011) The sudden emergence of pathogenicity in insect-fungus symbioses threatens naïve forest ecosystems. *Proc R Soc B* 278: 2866 ~ 2873
- 井田秀行・高橋 勸 (2010) ナラ枯れは江戸時代にも発生していた。日林誌 92 : 115 ~ 119
- Inch SA, Ploetz RC (2012) Impact of laurel wilt, caused by *Raffaelea lauricola*, on xylem function in avocado, *Persea americana*. *For Pathol* 42: 239 ~ 245
- 伊藤進一郎・窪野高徳・佐橋憲生・山田利博 (1998) ナラ類集団枯損被害に関連する菌類。日林誌 80 : 170 ~ 175
- Jeon J, Kim KT, Song H, Lee GW, Cheong K, Kim H, Choi G, Lee YH, Stewart JE, Klopfenstein NB, Kim MS (2017) Draft genome sequence of the fungus associated with oak wilt mortality in South Korea, *Raffaelea quercus-mongolicae* KACC44405. *Genome Announc* 5: e00797-17
- Katoh K, Rozewicki J, Yamada KD (2017) MAFFT online service: multiple sequence alignment, interactive sequence choice and visualization. *Brief Bioinform*, doi: 10.1093/bib/bbx108
- Kim KH, Choi YJ, Seo ST, Shin HD (2009) *Raffaelea quercus-mongolicae* sp. nov. associated with *Platypus koryoensis* on oak in Korea. *Mycotaxon* 110: 189 ~ 197
- Kubono T, Ito S (2002) *Raffaelea quercivora* sp. nov. associated with mass mortality of Japanese oak, and the ambrosia beetle (*Platypus quercivorus*). *Mycoscience* 43: 255 ~ 260
- Kumar S, Stecher G, Tamura K (2016) MEGA7: molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. *Mol Biol Evol* 33: 1870 ~ 1874
- 黒田慶子・山田利博 (1996) ナラ類の集団枯損にみられる辺材の変色と通水機能の低下。日林誌 78 : 84 ~ 88
- Kusumoto D, Masuya H, Hirao T, Goto H, Hamaguchi K, Chou WI, Suasa-ard W, Buranapanichpan S, Uraichuen S, Kern-asa O, Sanguansub S, Panmongkol A, Quang TP, Kahono S, Julistiono H, Kamata N (2014) Discoloration induced by *Raffaelea quercivora* isolates in *Quercus serrata* logs and its relation to phylogeny: a comparison among isolates with and without the Japanese oak wilt incidence including outside of Japan. *J For Res* 19: 404 ~ 410

- Kusumoto D, Masuya H, Ohmura K, Kamata N (2012) Virulence of *Raffaelea quercivora* isolates inoculated into *Quercus serrata* logs and *Q. crispula* saplings. J For Res 17: 393 ~ 396
- Lee JS, Haack RA, Choi WI (2011) Attack pattern of *Platypus koryoensis* (Coleoptera: Curculionidae: Platypodinae) in relation to crown dieback of Mongolian oak in Korea. Environ Entomol 40: 1363 ~ 1369
- Masuya H, Manabe R, Ohkuma M, Endoh R (2016) Draft genome sequence of *Raffaelea quercivora* JCM 11526, a Japanese oak wilt pathogen associated with the Platypodid beetles, *Platypus quercivorus*. Genome Announc 4: e00755-16
- 升屋勇人・山岡裕一 (2009) 菌類とキクイムシの関係. 日林誌 91 : 433 ~ 445
- 升屋勇人・山岡裕一 (2012) キクイムシの加害様式と随伴菌の病原性との関係. 日林誌 94 : 316 ~ 325
- Menitsky YL (2005) Oaks of Asia. Science Publishers, Enfield
- Murata M, Yamada T, Ito S (2005) Changes in water status in seedlings of six species in the Fagaceae after inoculation with *Raffaelea quercivora* Kubono et Shin-Ito. J For Res 10: 251 ~ 255
- Murata M, Yamada T, Matsuda Y, Ito S (2007) Discoloured and non-conductive sapwood among six Fagaceae species inoculated with *Raffaelea quercivora*. For Pathol 37: 73 ~ 79
- Musvuugwa T, De Beer ZW, Duong TA, Dreyer LL, Oberlander KC, Roets F (2015) New species of Ophiostomatales from Scolytinae and Platypodinae beetles in the Cape Floristic Region, including the discovery of the sexual state of *Raffaelea*. Antonie van Leeuwenhoek 108: 933 ~ 950
- O'Donnell K (1993) *Fusarium* and its near relatives. In: The fungal holomorph: mitotic, meiotic and pleomorphic speciation in fungal systematics. Reynolds DR, Taylor JW (eds) CAB International, 225 ~ 233
- Ploetz RC, Hulcr J, Wingfield MJ, De Beer ZW (2013) Destructive tree diseases associated with ambrosia and bark beetles: black swan events in tree pathology? Plant Dis 95: 856 ~ 872
- Ploetz RC, Pérez-Martínez JM, Smith JA, Hughes M, Dreaden TJ, Inch SA, Fu Y (2012) Responses of avocado to laurel wilt, caused by *Raffaelea lauricola*. Plant Pathol 61: 801 ~ 808
- R Development Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Simmons DR, De Beer ZW, Huang YT, Bateman C, Campbell AS, Dreaden TJ, Li Y, Ploetz RC, Black A, Li HF, Chen CY, Wingfield MJ, Hulcr J (2016) New *Raffaelea* species (Ophiostomatales) from the USA and Taiwan associated with ambrosia beetles and plant hosts. IMA Fungus 7: 265 ~ 273
- Takahashi Y, Matsushita N, Hogetsu T (2010) Spatial distribution of *Raffaelea quercivora* in xylem of naturally infested and inoculated oak trees. Phytopathology 100: 747 ~ 755
- Torii M, Ito M, Nagao M, Matsuda Y, Ito S (2016) Variation in virulence and hyphal growth of four *Raffaelea quercivora* isolates within *Quercus crispula*. For Pathol 46: 248 ~ 255
- Torii M, Matsuda Y, Seo ST, Kim KH, Ito S, Moon MJ, Kim SH, Yamada T (2014) The effect of *Raffaelea quercus-mongolicae* inoculations on the formation of non-conductive sapwood of *Quercus mongolica*. Mycobiology 42: 210 ~ 214

(2018.1.5受付, 2018.2.23掲載決定)



## 論文

# マルチコプター型ドローンを使った大型哺乳類センサスの可能性

丹羽悠二<sup>1</sup>・遠國正樹<sup>2</sup>・木村恒太<sup>3</sup>・楠本 大<sup>4</sup>

## 1. はじめに

近年、ニホンジカ (*Cervus nippon*, 以下 シカとする) やニホンイノシシ (*Sus scrofa leucomystax*) など一部の大型野生哺乳類の生息数が急速に増加し、農林業や生態系への被害が拡大している。被害の拡大を防ぐためには、生息密度、行動パターン、加害状況等をできるだけ正確に把握する必要がある。シカの密度を推定するための調査としては、地上からシカを目撃数をカウントする区画法やラインセンサス、上空から目撃数をカウントする航空機やヘリコプターを使ったセンサス、糞塊密度や狩猟の捕獲数による密度推定等、様々な手法がこれまでに試みられている (飯島 2016; 關ら 2015)。

上空から行うセンサスは、徒歩や車では到達しにくい場所を調査したり、短時間に広範囲を見渡せるという点で有用である。しかしながら、有人で行う航空機センサスは、観察者の熟練度が精度に影響するにもかかわらず (丸山・岩野 1980)、フライト経費が高額であり、頻繁に調査を行うこと自体が難しい。これに対し、より安価な方法として、無人航空機の活用が期待されている (關ら 2015)。

無人航空機はドローンやUnmanned Aerial Vehicle (UAV), Unmanned Aircraft Systems (UAS) とも称される操縦者が搭乗しないタイプの航空機 (以下 ドローンとする) のことで、近年は、固定翼型や回転翼が3つ以上あるマルチコプター型のドローンがホビー用、産業用ともに広く普及してきている。これらのドローンはGPSや加速度センサー、電子コンパスを搭載しているため操作が簡単なだけでなく、プログラムによって自律飛行も可能になっている。また、高解像度のビデオカメラを搭載することで高精細な空撮画像を取得することが可能になっている。

海外では既に、多様な野生動物に対しモニタリングやセンサスへの応用可能性が検討され、いくつかの報告がなされている (Vermeulen *et al.* 2013; Linchant *et al.* 2015; McEvoy *et al.* 2015)。しかしながら、これらの報告はサバンナや湖沼など開けた土地で行われた事例のみで、森林など樹木が密集した場所での検討例がない。

森林での利用を考えた場合、垂直離着陸やホバリングができ、小回りの利くマルチコプター型ドローン (以下 マルチコプターとする) の方が、離着陸に広い平地を必要とする固定翼型ドローンよりも実用性が高いと考えられる。そこで本研究では、シカのセンサスを念頭に、森林におけるマルチコプターの応用可能性について検討することとした。従来、航空機センサスでは、樹冠による遮蔽がシカの発見率を低下させるため、落葉樹林帯では葉が落葉している冬期に行うのがよいとされている (丸山・岩野 1980)。また、積雪条件下では動物と地面とのコントラストが明瞭になるため、さらに発見が容易になると考えられる。しかし、気温が氷点下近くになる環境では、一般にバッテリー電圧の急激な低下が起こり易く、マルチコプターによるセンサスが十分に行えない可能性が懸念された。そこでまず、厳寒期の北海道で飛行試験を行い、マルチコプターの飛行時間とバッテリー残量との関係について調査した。次に、マルチコプターの飛行高度を変えて撮影した動画から、どの高度ならシカの抽出や他の動物との区別が可能かについて検討した。

## 2. 材料と方法

### (1) 使用したマルチコプターおよび撮影機材

調査には、回転翼が4つ付いたマルチコプター

Availability of a multicopter-type drone for large mammal census.

<sup>1</sup>NIWA, Yuji, 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林教育研究センター; <sup>2</sup>TOKUNI, Masaki, 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林; <sup>3</sup>KIMURA, Kota, 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林;

<sup>4</sup>KUSUMOTO, Dai, 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林田無演習林



写真-1 使用したマルチコプター

表-1 調査に用いたマルチコプターの仕様

機種名	Phantom4	
機体	重量	1380g
	対角寸法	350mm
	最大飛行時間	約28分
カメラ	センサー	1/2.3 CMOS
	レンズ	FOV94° 20mm(35mm換算) f/2.8, ∞フォーカス
	ISOレンジ	100~3200
	電子シャッター	8~1/8000s
	動画解像度	UHD:4096×2160
	フレームレート	24fps
	ビットレート	60Mbps
バッテリー	タイプ	リチウムポリマー LiPo4S
	容量	5350mAh
	電圧	15.2V

Phantom4 (DJI社, 中国) を使用した (写真-1)。機体重量は1380 g, 回転翼を含まない対角寸法は350 mm, 満充電した付属のバッテリーを使って約28分間の飛行が可能とされる。Ultra High Definitionといわれる高画質なRGB動画が撮影でき, ドローンの動きによって生じる画像のブレを防止するジンバルを備えた, 一体型のカメラを搭載している。その他のスペックは表-1の通りである。

## (2) 厳寒期における飛行可能時間の調査

飛行調査は, 北海道富良野市にある東京大学大学院農学生命科学研究科附属北海道演習林内の平坦な針広混交天然林 (標高約420m) で, 2016年12月15日

に行った。調査日の天候は晴れ, 調査地から南に約10km離れた場所にある気象庁の幾寅観測所 (空知郡南富良野町幾寅, 標高350m) のデータによると, 正午の気温は-6.5℃であった。地表面は雪で完全に覆われていた。過去の経験から, この時期, 同種のバッテリーを外気温にさらすと, マルチコプターが動作しないことが分かっていた。そこで, 今回の調査では, 野外での離陸直前まで, バッテリーを防寒着の内ポケットで保温した。

マルチコプターは, 航空法に定められたルールに則り, 日中に目視の範囲内で飛行し, 高度は150mを超えない範囲とした。飛行速度を10km/h, 範囲

を200m四方の自動航行とし4つのバッテリーを充電を繰り返しながら、バッテリー残量が30%を切るまで計7回飛行させた。カメラは解像度4096px×2160px、フレームレート24fps、ビデオビットレート60Mbpsで動画撮影した。バッテリーを1回交換するごとの飛行距離、飛行時間、バッテリー残量を記録した。

(3) 撮影高度がシカの画像判別に与える影響

2017年2月14日、地上から肉眼で発見したシカの群れを、手動操縦したマルチコプターで高度50, 100, 150mから動画撮影した。撮影日の天候は曇り、正午の気温は-2.2℃(気象庁幾寅観測所)であった。動画は解像度4096px×2160px、フレームレート24fps、ビデオビットレート60Mbpsで撮影した。また、動画編集ソフト(TMPGEnc Video Mastering Works 6, ペガシス)を用いて、動画から1コマ分の静止画を作成した。撮影した画像をコンピュータのディスプレイ上に表示し、画像からシカだと判別できるか確認した。

3. 結果と考察

(1) 厳寒期における飛行可能時間

飛行時間とバッテリー残量との関係を図-1に示した。バッテリー残量は飛行時間に対し一定の速度で減少し、個々のバッテリーや飛行高度の違いによ

る差はほとんどみられなかった。今回の調査ではバッテリー残量が30%になったところで測定を中止したが、図-1で残量が0%まで直線的に減少していくものと仮定すると、最大飛行時間は約25分となり、カタログで示されている最大飛行時間28分とほとんど変わらない値となった。菅沼ら(2017)は、別機種において、南極の極低温下でのドローン飛行に際し、バッテリーを加温・保温することで、性能の低下が避けられることを確認している。今回の調査で使用した機種においても、バッテリーの保温を適切に行うことで、低温によるバッテリー性能低下の問題は回避できると考えられた。

(2) 撮影高度がシカの画像判別に与える影響

撮影高度が異なるすべての動画において、シカが少しでも移動していれば、少なくとも何かしらの動物であることは明瞭に判別できた。そこで、画面を拡大することによって、どの高度ならシカと判別できるか検証した。高度50, 100, 150mから撮影した動画の全体像をそれぞれ写真-2 A, C, Eに、また、各画像のシカをそれぞれ6.3, 12.6, 18.9倍に拡大したものを写真-2 B, D, Fに示した。高度50m撮影では、シカの頭部や脚部の形状がはっきりと写っており、拡大すれば、尾部の白い毛まで確認することができた。高度100m撮影では、細部は不鮮明になり、胴と頭部の形状が長楕円形の一端が細

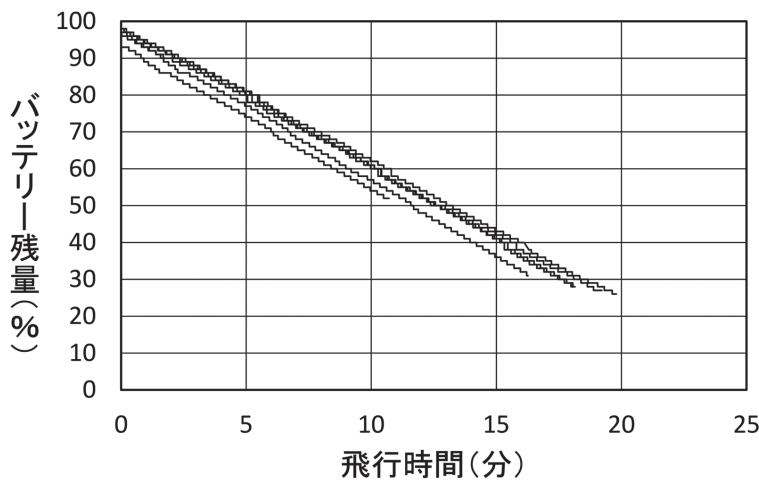


図-1 飛行時間とバッテリー残量

図中の各折れ線は7回のフライトの個々の結果を表す。



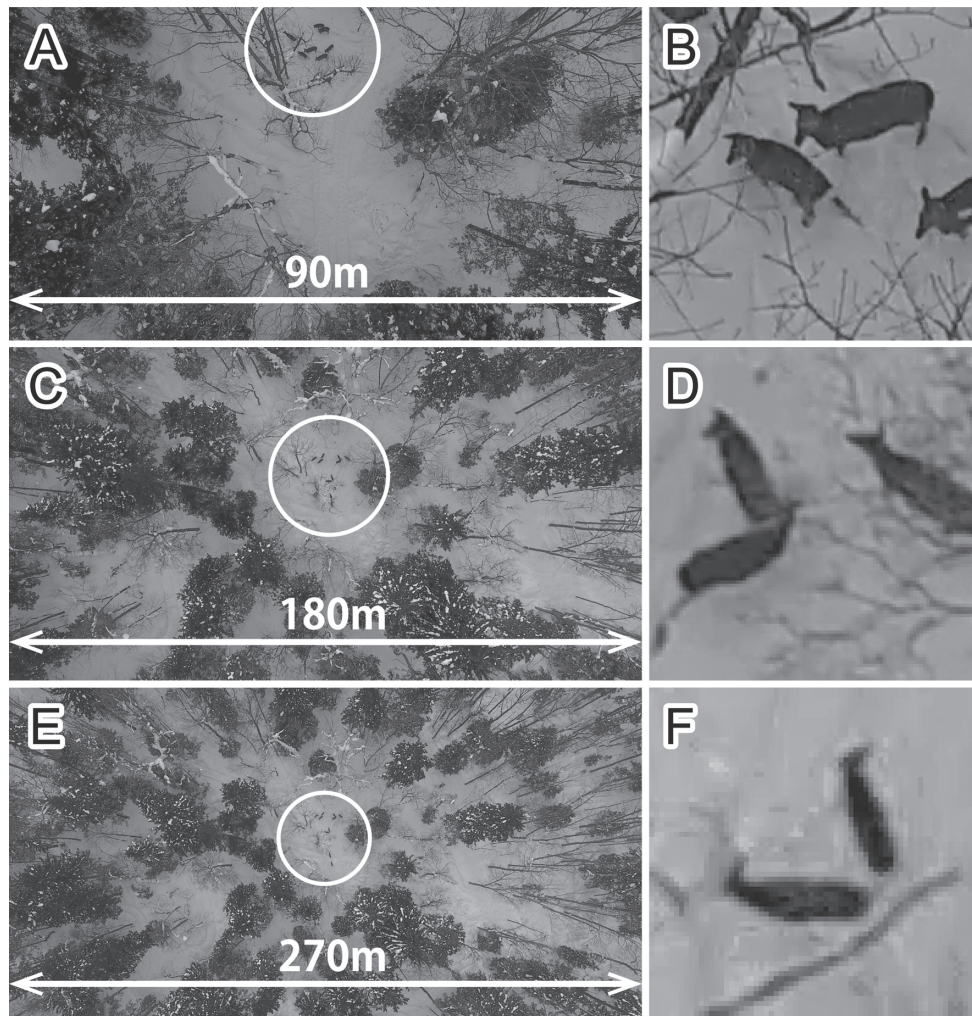


写真-2 高度50, 100, 150mから撮影した動画のキャプチャ画像（それぞれA, C, E）とシカのクローズアップ画像（それぞれB, D, F）  
A, C, Eの白丸で囲った中にシカが写っている。

く突き出たようなシルエットとして認識された。角度によっては耳や脚部の形状まで見えることがあった。高度150m撮影では、胴と頭部のシルエットしか認識できなかった。つまり、高度100m以上では、動きや群れの様子からシカらしいことは認識できるが、シカであると断定することは難しいと判断された。また、シカが静止しているような状態では、シルエットの形状によっては倒木などの物体に見えなくもなかった。その一方で、シカが存在していない範囲では、シカに見間違えそうなものは何も写っていなかった。

次に、静止画からシカの体長を推定してみた。撮

影に用いたカメラの焦点距離は35mm判換算で20mm相当、画面解像度は4096px×2160pxである。高度50, 100, 150mでの撮影範囲の長辺を計算すると、地上での距離はそれぞれ90, 180, 270mとなり、画像1ピクセル当たりの長さはそれぞれ2.2, 4.4, 6.6cmとなった。このことからシカの体長を画像解析すると、いずれの高度からの撮影でも140～160cmという結果となり、シカの体長として妥当な値を示した。

以上のことから、地面が完全に雪で覆われている状態では、シカに見間違えそうなものは他には写っておらず、また、シカは群れでいたり、動いたりしていたので、動画から発見するのは容易であった。

しかしながら、高度100mや150mの動画では、大きさやシルエットからおおよその推測はできるものの、シカだと確信できるほどの鮮明さはなかった。これらのことから、センサスでは対象哺乳類が体長やシルエットから明らかな場合は高度100m以上の撮影でもよいが、それらから区別できない場合は高度50m程度まで下げて撮影するのがよいと判断された。

なお今回の調査では、高度50m程度まで下げて撮影した場合においても、翼の回転音などによって驚いたり、逃げたりする行動は確認できなかった。マルチコプターが50m程度まで動物に接近しても逃避行動を取らないという結果は、クマや水鳥においても報告されている (Ditmer *et al.* 2015; McEvoy *et al.* 2015)。

### (3) マルチコプターによるセンサスの課題

航空法によるドローンの飛行ルールでは、許可のない目視外飛行を禁じている。今回使用したマルチコプターは200m以上離れると小さな点にしか見え、目視で操縦できる限界であった。つまり、操縦者を中心とした半径200mの範囲が実質的な最大飛行範囲といえる。そのため、一度の飛行で撮影を行う範囲はこの範囲内に収まるように計画する必要がある。

調査区全体を撮影する場合、ドローンをジグザグに往復飛行させながら全域を撮影する方法が効率的だと考えられる。ただし、このような飛行方法を採用する際は、往路で撮影したシカが復路に移動することでダブルカウントする懸念があるため、シカの移動速度を考慮した上で、飛行ルートの間を離しておくことが必要だと指摘されている (Chrétien *et al.* 2015)。一方で、被写体は画像の中心から離れるほど斜めに写るため、画像の端に針葉樹の樹冠が写ると地上の見通しが悪くなっていた (写真-2)。樹冠の反対側にいるシカを見落とさないためには、撮影範囲を重複させて、死角を作らないような飛行ルートの設計が必要だと考えられる。今後は様々な飛行ルートを試行し、どのような飛行ルートであれば精度よくシカの個体数をカウントできるか検証することが必要である。

## 4. まとめ

本調査から、厳寒期の北海道においても、バッテリーを使用前に保温しておけば、マルチコプターを飛行させることは十分に可能であることが示された。また、地上解像度2cm以下で画像を取得すれば、シカの判別も可能であることが分かった。飛行高度が50mであれば樹冠よりも十分高いため、森林でもマルチコプターを使ったシカのセンサスが可能であると期待される。撮影された動物の判別はビデオカメラの解像度に大きく依存することが分かっており (McEvoy *et al.* 2015)、今後、ビデオカメラの性能が高まれば、より高高度からの撮影や、より小型の動物の撮影にも利用することができるだろう。また、赤外線カメラを使ったセンサスも行われており (Chrétien *et al.* 2015)、目的に合わせてカメラを選択することにより、精度の高いセンサスが可能になると期待される。

今回の調査では、高度50mで近づいてもシカが逃げ出すようなことはなかった。そのため、人が近くと逃げ出してしまふシカの行動観察など、センサス以外での応用についても期待が持てる。

## 引用文献

- Chrétien LP, Théau J, Ménard P (2015) Wildlife multispecies remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4: 241 ~ 248
- Ditmer MA, Vincent JB, Werden LK, Tanner JC, Laske TG, Iaizzo PA, Garshelis DL, Fieberg JR (2015) Bears show a physiological but limited behavioral response to unmanned aerial vehicles. *Curr Biol* 25: 2278 ~ 2283
- 飯島勇人 (2016) シカ類の個体群動態の推定における状態空間モデルの有用性. *日本生態学会誌* 66: 351 ~ 359
- Linchant J, Lisein J, Semeki J, Lejeune P, Vermeulen

- C (2015) Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. *Mamm Rev* 45: 239 ~ 252
- 丸山直樹・岩野泰三 (1980) 表日光におけるニホンジカのエアカウントの精度. *哺乳動物学雑誌* 8: 139 ~ 143
- McEvoy JF, Hall GP, McDonald PG (2015) Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. *PeerJ* 4: e1831
- 關 義和・江成広斗・小寺祐二・辻 大和 (2015) 野生動物管理のためのフィールド調査法. 京都大学学術出版会, 京都
- 菅沼悠介・川又基人・白水 薫・小山拓志・土井浩一郎・金田平太郎・青山雄一・早河秀章・小花和宏之 (2017) 南極における無人航空機 (UAV) を用いた高解像度地形情報取得の試み. *地学雑誌* 126(1): 1 ~ 24
- Vermeulen C, Lejeune P, Lisein J, Sawadogo P, Bouché P (2013) Unmanned aerial survey of elephants. *PLoS One* 8(2): e54700  
(2018.01.12受付, 2018.2.26掲載決定)



# 埼玉県におけるニホンジカの被害対策について

## ○はじめに

埼玉県内における野生鳥獣による森林被害のほとんどはシカによる造林地の被害であり、その範囲は県西部山間地に秩父地域から、北部の山沿いや中山間地域へと拡大しています。

被害のあった市町村の数は、平成10年度に5市町であったものが、平成28年度には14市町村まで拡大しています(図-1)。

被害の内容も、幼齢木の食害だけでなく、成林における剥皮被害も出現しています。

シカによる実損面積は平成28年度が37haであり、この5年間で約1.8倍に増加しています(図-2)。

成林の被害にあった森林の多くは、主に収入間伐や主伐が期待できる林地であり、経済的損失となることが懸念されています。

また、場所によっては、下層植生が食害を受け、表土が流出し崩壊地となる危険が迫っている状況も見られるようになりました。

## ○被害対策

野生鳥獣被害、とくにシカによる造林地の被害を

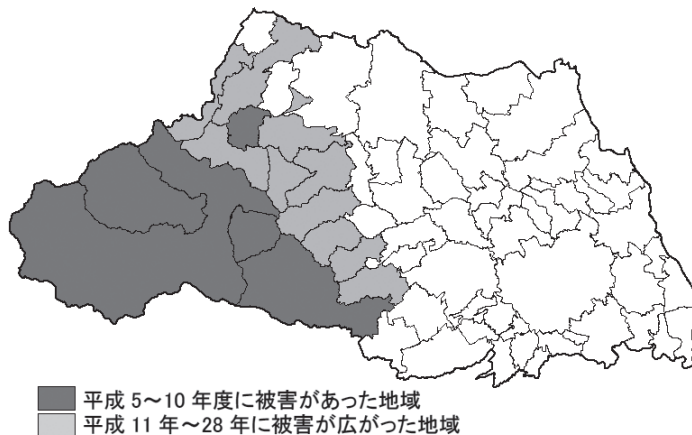


図-1 シカによる森林の被害の範囲

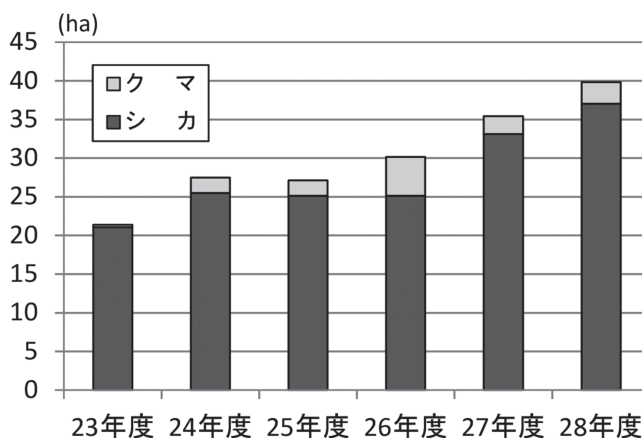


図-2 野生鳥獣害の実損面積の推移

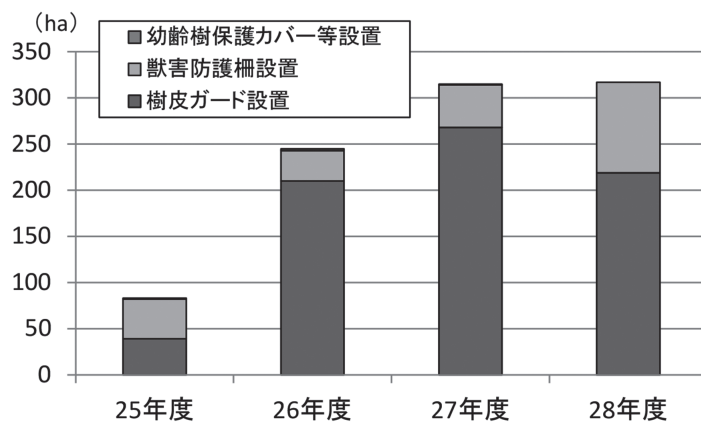


図-3 野生鳥獣害防除実績の推移

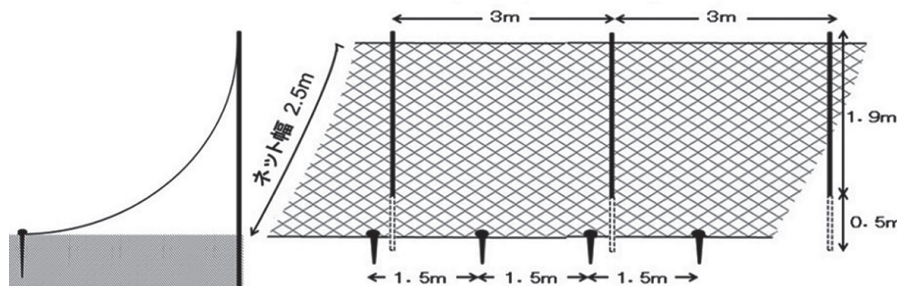


図-4 斜め張りネット「さいねっと」



写真 「さいねっと」設置状況

防止するため、県では幼齡樹保護カバーや獣害防護柵、樹皮ガードにより対策を行ってきました(図-3)。

この中で、獣害防護柵については、今まで設置コストに費用が掛かり、その削減が課題となっていました。県と民間事業者が共同により、支柱と金具

などの材料を大幅に減らすことで単価を約半分に削減した低コスト防護柵(斜め張りネット「さいねっと」)を開発し、平成28年度以降、順次設置を進めています(写真:図-4)。

### ○ニホンジカの捕獲

ニホンジカによる被害防止は獣害防護柵等による被害対策と併せ、生息数を低下させることが必要です。県内におけるニホンジカの捕獲頭数は年々増加しており、狩猟、有害鳥獣捕獲および県が実施主体の指定管理鳥獣捕獲事業による捕獲の合計で、平成28年度は約3千頭であり、5年間で倍になっています(図-5)。

また、「埼玉県第二種特定鳥獣管理計画(ニホンジカ)」においても、捕獲頭数を狩猟と有害鳥獣捕獲で年間3,000頭程度としており、その他、県が主体になりできるだけ多く捕獲することを目指しています。

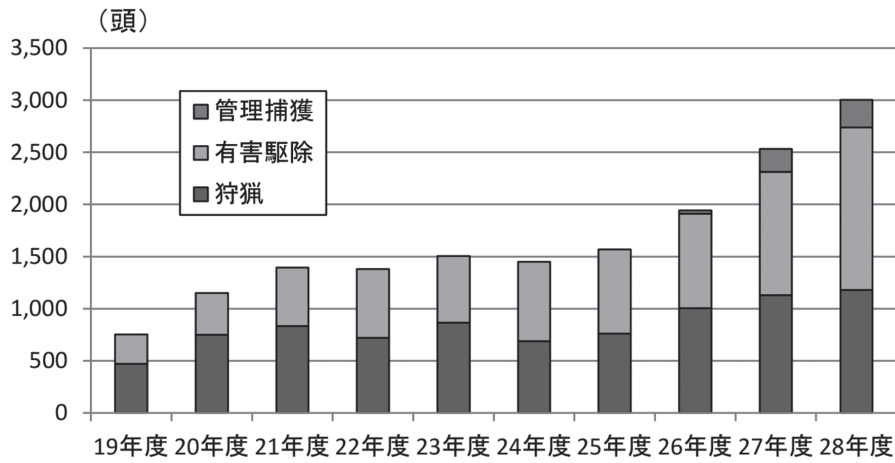
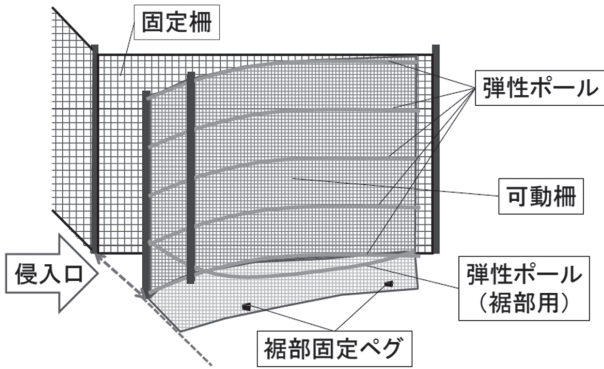
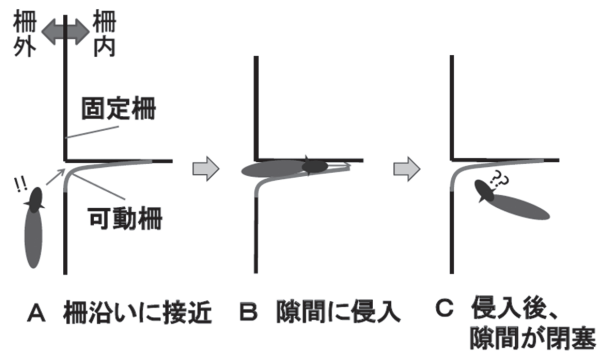


図-5 ニホンジカ捕獲頭数の推移

スリット式ワンウェイゲートの構造



スリット式ワンウェイゲートのイメージ



捕獲柵の概要

ステンレス線入ポリエチレンネット  
 周囲長 約280m  
 高さ 2m

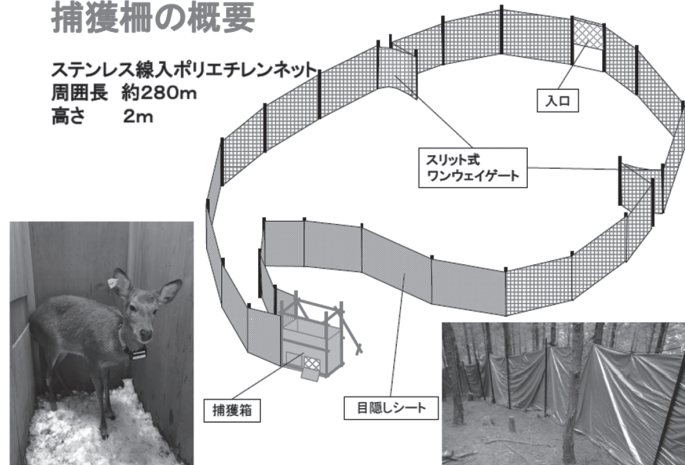


図-6 スリット式ワンウェイゲート



しかし、捕獲の担い手である狩猟免許保持者は高齢化や減少が進んでいるため、捕獲頭数を現在の水準に維持することは今後困難になると想定されます。

そこで、県の森林・林業に関する試験研究機関である寄居林業事務所森林研究室では、効率的な捕獲を実施するため、簡易な構造で設置が容易な「スリット式ワンウェイゲート」という新たな捕獲技術の開発に取り組んでいます（図-6）。

これは、隙間に潜り込むというシカの習性を利用して、狭い隙間と可動式のゲートを組み合わせた構造であり、多数のシカを短期間に捕獲できる可能性があります。

また、これと併せ、平成29年度から、効率的な捕獲を行うため、「ニホンジカ捕獲効率向上のための技術開発」に取り組んでいます。これはシカの生息密度が季節的に変化していると考え、その実態を明

らかにするためGPSを使ったシカの移動ルートの把握を行うものです。

これらの成果を生かし、ゲートの設置場所や時期を特定して、より効率的な捕獲ができるよう技術の確立を目指しています。

## ○おわりに

野生鳥獣害対策、とりわけニホンジカによる森林被害への対策は、利用期を向かえた森林資源の「伐って・使って、植えて、育てる」ことによる循環利用を推進にあたり、その成否を左右する大きな課題となっています。

県ではこれからも引き続き研究や事業を同時に進め、この課題に取り組んでまいります。

(埼玉県農林部森づくり課木材利用推進・林業支援担当)

## 林野庁だより

人事異動（平成30年4月1日）

竹崎桂子（森林整備部研究指導課保護企画班企画係長）

→ 退職（高知県安田町経済建設課振興監）

高野理洋（（国研）森林研究・整備機構森林保険センターリスク管理室監査係長）

→ 森林整備部研究指導課保護企画係長

## 森林防疫ジャーナル

森林総合研究所生物関連人事異動

（平成30年3月31日）

根田 仁（研究ディレクター（生物機能研究担当））

→ 退職

赤間慶子（森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域チーム長）

→ 退職

（平成30年4月1日）

山中高史（森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域長）

→ 研究ディレクター（生物機能研究担当）

岡 輝樹（森林研究部門野生動物研究領域長）

→ 森林研究部門長併任

→ 森林研究部門副部門長併任

服部 力（森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域森林病理研究室長）

→ 森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域長

→ 森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域微生物生態研究室長事務取扱

小坂 肇（九州支所森林微生物管理研究グループ長）

→ 森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域森林病理研究室長

石橋靖幸（北海道支所チーム長（野生動物管理担当））

→ 北海道支所森林生物研究グループ長

佐藤重穂（北海道支所森林生物研究グループ長）

→ 四国支所チーム長（生物被害担当）

伊藤賢介（北海道支所森林生物研究グループ再雇用研究専門員）

→ 北海道支所地域連携推進室

→ 北海道支所森林生物研究グループ併任

奥村栄朗（四国支所流域森林保全研究グループ再雇用研究専門員）

→ 四国支所地域連携推進室併任

赤間慶子

→ 森林研究部門きのこ・森林微生物研究領域再雇用研究専門員

牧野俊一（戦略研究部門生物多様性研究拠点再雇用研究専門員）

→ 森林研究部門森林昆虫研究領域併任

## 森林病虫獣害発生情報：平成30年3～4月受理分

病 害

なし

獣 害

なし

(森林総合研究所 服部 力/佐藤大樹/岡 輝樹)

虫 害

なし



**森林防疫** 第67巻第3号(通巻第726号)  
平成30年5月25日 発行(奇数月25日発行)

編集・発行人 佐藤重芳  
印刷所 松尾印刷株式会社  
東京都豊島区東池袋5-45-5  
ASビル  
☎ (03) 5944-9853

定価 1,339円(送料込, 消費税込)  
年間購読料 6,696円(送料込, 消費税込)

発行所 全国森林病虫獣害防除協会  
National Federation of Forest Pests Management  
Association, Japan

〒101-0047 東京都千代田区  
内神田 1-1-12(コープビル)

☎ (03) 3294-9719 FAX (03) 3293-4726

振替 00180-9-89156

<http://bojyokyokai.main.jp/>