

松本地域におけるマツ材線虫病の被害拡大と カラフトヒゲナガカミキリの影響

柳澤賢一・清水香代*・戸田堅一郎*・田中裕二郎*・岡田充弘*

被害先端地や標高 800m を超える高標高地におけるマツ材線虫病被害の推移と防除対象となる媒介昆虫種を把握することを目的とし、被害が激害化している松本地域における被害の程度別および標高別の媒介昆虫種とその保持線虫種等を調査した。その結果、冷涼な気候でも生息できるカラフトヒゲナガカミキリは標高 800～1,000m でマツノザイセンチュウを保持していたがその保持頭数は少なく、標高 1,000m 以下では被害の進行とともに媒介昆虫種がマツノマダラカミキリに短期間で置換したと考えられたことから、この標高帯の主な本病媒介者はマツノマダラカミキリであると結論した。一方、カラフトヒゲナガカミキリは少なくとも標高 1,400m 付近までは標高の制限を受けることなく繁殖できることに加え、被害の拡大速度とマツノマダラカミキリへの置換は標高が上がるほど遅いと推測されたことから、高標高側の被害先端地ではマツノザイセンチュウを保持したカラフトヒゲナガカミキリが出現する可能性があった。

キーワード：マツ材線虫病，被害先端地，高標高地，マツノマダラカミキリ，カラフトヒゲナガカミキリ

目次

- 1 緒言
- 2 カラフトヒゲナガカミキリの県内分布と保持線虫種
- 3 松本地域における媒介昆虫と保持線虫の実態
 - 3-1 松本地域における被害先端ラインの推定
 - 3-2 被害の程度別媒介昆虫の生息状況と保持線虫種
 - 3-3 標高別被害と媒介昆虫の生息及び保持線虫種
 - 3-4 標高別被害木から羽化脱出する媒介昆虫種と保持線虫種
- 4 カラフトヒゲナガカミキリの影響の検討
 - 4-1 標高別媒介昆虫の越冬試験
 - 4-2 ザイセンを保持したカラフトの出現地予測
- 5 結言
- 6 謝辞

1 緒言（はじめに）

マツ材線虫病は、北米由来の病原体であるマツノザイセンチュウ (*Bursaphelenchus xylophilus*, 以下、ザイセン) により、日本ではクロマツやアカマツなどが枯死する重要病害である。日本におけるザイセンの媒介昆虫となりうる昆虫は、在来のマツノマダラカミキリ (*Monochamus alternatus*, 以下、マダラ) やカラフトヒゲナガカミキリ (*Monochamus saltuarius*, 以下、カラフト)、ヒゲナガカミキリ

(*M. grandis*) だけとされる。特にザイセン保持数はマダラが非常に多く、次いでカラフトが多いとされ (楨原 1997)、主にマダラがザイセンの媒介者とされる。一方、カラフトによる本病媒介の可能性については、佐藤ら (1987) が実験的にカラフトが本病の媒介昆虫となることを確認するとともに、韓国では温暖な南部でマダラ、冷涼な北部でカラフトが媒介しているとされる (Shin 2008)。

長野県においては 1981 年に旧山口村で最初の被害が発生してから被害区域は拡大しており、2015 年に被害数量が 78,870m³ でピークとなったのち増減を繰り返し、2020 年度には 64,022m³ と漸減している (長野県林務部 2022)。一方、被害の侵入が遅かった松本地域は、2000 年に初被害を確認したのち増加し続け、2020 年には被害数量が県内で最も多い 28,619 m³ となっている (長野県林務部 2022)。さらに、これまで激害化しにくく被害を効果的に防除できるとされてきた標高 800m 付近 (岡田・小山 2006) においても近年は被害が継続して発生している。冷涼な高標高地を有する県内アカマツ林での本病媒介者は、マダラのみではなくカラフトの影響も考えられるが、実態は不明である。

本研究では、高標高地の防除戦略に資するため、松本地域において高標高地を含む被害先端地のマツ材線虫病の被害状況を把握し、被害の推移、媒介昆虫の種と密度、それらが保持する体内線虫種の相

*元 長野県林業総合センター育林部

互関係から、被害の実態を明らかにするとともに、カラフトヒゲナガカミキリの本病媒介者としての影響について評価した。なお、本研究は、主に県単課題(平成29年度～令和3年度)として実施し、線虫種の調査は国立研究開発法人森林総合研究所東北支所において行った。また、報告の一部に科研費基盤B「侵略的外来線虫の分布拡大速度に及ぼす土着線虫と媒介昆虫密度の影響(平成26-29年度)」により実施した結果を加えた。

2 カラフトヒゲナガカミキリの県内分布と保持線虫種

(1) 目的

カラフトの県内生息状況については、小島(1989)が整理しているが、当時はマツ材線虫病の発生初期段階であり、現在の状況を示す資料はない。またそれらが体内に保持する線虫の情報はない。そこで本章では、県内各地域の高標高地域におけるカラフトの生息分布および保持線虫種を調査した。また、野外捕獲個体や産卵丸太から翌年に羽化脱出した成虫の体内保持線虫種等を調査し、高標高地域でカラフトがザイセンを保持する条件を検討した。

(2) 方法

カラフトの生息分布状況を把握するため、県内9地域において、標高880～980mの未被害アカマツ林を調査地として選定した(表-1)。各調査地内において、性成熟し産卵するカラフト成虫を誘引して生体捕獲するため、本病未被害地で胸高直径20cm程度の健全なアカマツを伐倒して長さ1mに玉切りし、乾燥しないよう両木口にコーキング剤を塗布した丸太(以下、おとり丸太)を作成し、1地点あたり約0.1m³を各調査地内の3地点に約100m離してアカマツ林樹冠下に設置した。媒介昆虫の捕獲は、おとり丸太に飛来したカミキリ種を全て捕獲し、その種の同定を行なった。次に、捕獲された媒介昆虫を全て解剖し、ベールマン法により48～72時間以内に線虫を抽出した。また、調査地別に保管したおとり丸太から翌年に羽化脱出した媒介昆虫を調査地ごとに最大45頭の媒介昆虫を解剖し、上記と同様にベールマン法により線虫を抽出した。線虫の同定方法は、媒介昆虫1頭につき線虫10頭を最大数としてマツ材線虫病診断キット(相川ら2010, ニッポンジーン社)の試薬に入れ、LAMP法を利用して

ザイセンの有無を確認する方法(方法a)と、線虫10頭の混合DNAを鋳型として種特異的なプライマー(Matsunaga & Togashi 2004)によるPCRを行い、ザイセンと病原性のないニセマツノザイセンチュウ(*B. mucronatu*, 以下、ニセマツ)の有無を確認する方法(方法b)とした。方法aは当センター、方法bは(国研)森林総合研究所東北支所において実施した。おとり丸太は、2017年5月22日から順次設置した。媒介昆虫の捕獲調査は、2017年6月5日から7月15日まで週に一度の頻度で計6回行なった。また、調査終了後の7月13日から7月20日にかけて各調査地のおとり丸太を回収し、調査地別に当センター構内に設置した昆虫網室内(標高約870m)に保管して2018年に羽化脱出した媒介昆虫を捕獲した。あわせて、全てのおとり丸太の媒介昆虫の脱出孔数を計数し、元口径と末口径から平均木口径を算出して産卵の最適な径級を推定した。

(3) 結果と考察

調査地別で野外捕獲されたカラフトの捕獲頭数を図-1に示す。カラフトが捕獲された地域は9調査地中7地域であった。カラフトの捕獲頭数が最も多かったのは佐久穂町の13頭で、千曲市や富士見町では捕獲されなかった。今回の調査結果と過去の調査結果(小島1989)を重ねたカラフト分布図を図-2に示す。これにより、12市町村でカラフトが生息していることを確認した。また、産卵木平均木口径級と平均脱出孔数の関係を図-3に示す。最も多く脱出した平均径級は6～8cmであり、長さ1mで平均径級2～16cmの細丸太から平均1頭以上の成虫が羽化した。カラフトは比較的細い径級を繁殖に利用すると推測された。

野外で捕獲された媒介昆虫体内及び、おとり丸太から翌年羽化脱出した媒介昆虫体内の線虫保持状況を表-2に示す。カラフトが野外捕獲された調査地全てのおとり丸太から、翌年カラフトが羽化脱出した。野外捕獲された媒介昆虫のうち、箕輪町のカラフトと松本市のマダラはザイセンを保持していた。松本市のカラフトは捕獲直後に死亡したため、線虫の抽出ができなかった。また、翌年羽化脱出した媒介昆虫のうちザイセンを保持していたのは、松本市のマダラとカラフト、大町市のカラフトであった。松本市のように、被害が近接している標高950mの高標高地域でマダラとカラフトが混在する場合、

マダラの産卵時におとり丸太にザイセンが入り、翌年脱出したマダラとカラフトがザイセンを保持して羽化したと考えられた。また、大町市においてはマダラの発生はなかったものの、付近にマツ材線虫病被害木が点在しており、カラフトの産卵時におとり丸太にザイセンが入り、翌年カラフトがザイセンを保持して羽化した可能性があった。以上のことから、標高 880~980m までの高標高地において新鮮な

アカマツ細丸太を野外に放置した場合はカラフトがそれを産卵元として確実に繁殖すること、さらに被害が近接している場所に放置した場合は翌年にザイセンを持ったカラフトが羽化脱出する可能性があることが示唆された。被害先端地等で更新伐などによりアカマツを伐採した際は、直径 2cm 以上の枝を含む残材を除去する必要があると考えられる。

表-1 調査地概要とおとり丸太の設置、回収年月日

市町村	標高(m)	近隣低標高地での被害有無	おとり丸太設置年月日	おとり丸太回収年月日
佐久穂町	980	あり	H29.5.23	H29.7.18
長和町	880	あり	H29.5.29	H29.7.18
富士見町	970	なし	H29.5.26	H29.7.21
箕輪町	920	あり	H29.5.26	H29.7.13
喬木村	950	なし	H29.5.24	H29.7.13
上松町	890	なし	H29.5.28	H29.7.13
松本市	945	あり	H29.5.22	H29.7.20
大町市	920	あり	H29.5.22	H29.7.20
千曲市	890	なし	H29.6.8	H29.7.18

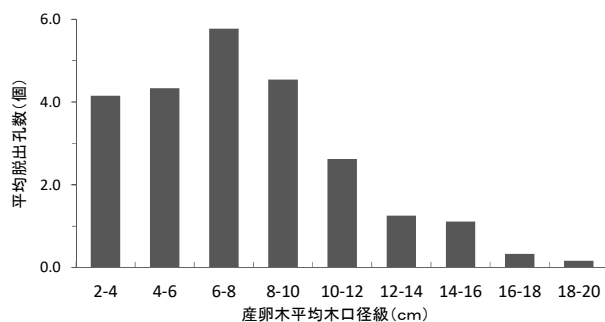


図-3 産卵木平均木口径級と平均脱出孔数の関係

表-2 媒介昆虫体内の保持線虫状況

(上段: 野外捕獲個体, 下段: おとり丸太脱出個体)

調査地	野外捕獲媒介昆虫種	解剖頭数(頭)	線虫種		線虫保持率(%)	ザイセン保持率(%)	線虫同定方法
			ザイセン	その他			
佐久穂町	カラフト	13	-	-	0	0.0	方法a
長和町	カラフト	1	-	-	0	0.0	方法a
富士見町	なし	0	*	*	*	*	*
箕輪町	カラフト	9	+	+	33.3	11.1	方法a
喬木村	カラフト	1	-	+	0	0.0	方法a
上松町	カラフト	6	-	+	16.7	0.0	方法a
松本市	マダラ	3	+	+	100	33.3	方法a
大町市	カラフト	0	*	*	*	*	*
千曲市	なし	0	*	*	*	*	*

調査地	おとり丸太脱出媒介昆虫種	解剖頭数(頭)	線虫種		線虫保持率(%)	ザイセン保持率(%)	線虫同定方法
			ザイセン	ニセマツ			
佐久穂町	カラフト	45	-	+	40.0	0.0	方法a, b
長和町	カラフト	9	-	x	20.0	0.0	方法a
富士見町	なし	0	*	*	*	*	*
箕輪町	カラフト	22	-	-	0.0	0.0	方法a, b
喬木村	カラフト	22	-	+	81.8	0.0	方法a, b
上松町	カラフト	22	-	-	0.0	0.0	方法a, b
松本市	マダラ	10	+	-	30.0	30.0	方法a, b
大町市	カラフト	45	+	+	60.0	31.1	方法a, b
千曲市	なし	0	*	*	*	*	*

※符号: +あり、-なし、x不明、*媒介昆虫の生存個体捕獲なしのため線虫抽出なし

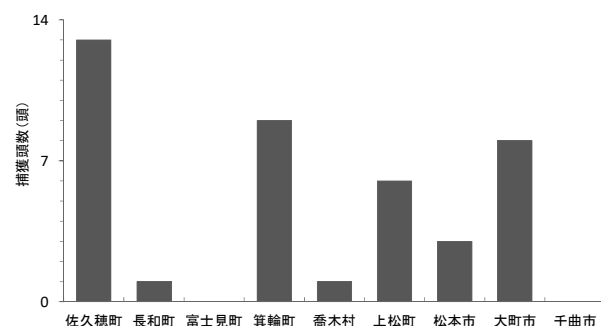


図-1 調査地別カラフトの捕獲頭数

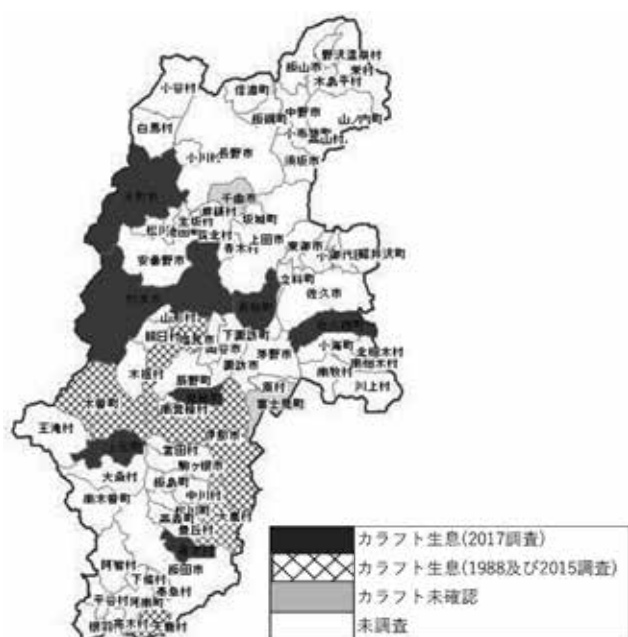


図-2 カラフトヒゲナガカミキリの県内分布

3 松本地域における媒介昆虫と保持線虫の実態

2の調査結果から、箕輪町、松本市、大町市の調査地由来のカラフトが体内にザイセンを保持していた。ここではザイセンを保持したカラフトが被害の程度や標高の違い等の条件によってどこに出現するのかを明らかにするため、上記調査地のうち近年被害が最も多い松本地域で、水平方向や高標高側へ拡大している箇所を対象として、定点プロットにより枯損木調査と媒介昆虫の捕獲調査を行った。

3-1 松本地域における被害先端ラインの推定

(1) 方法

調査開始時の 2014 年度における松本地域の本病の被害先端ラインを推定するため、月一度程度の定

期観測により発見した新規枯損木の位置情報をGPS 機器や図面上に記録した。マツ材線虫病は、被害木内にザイセンが存在するあるいは存在した痕跡があることで定義づけられる。そこで、各枯損木の枯死原因がマツ材線虫病であるかを確認するため、直径 15mm のドリルを用いて枯損木から辺材部の材片を採取し、ベールマン法により抽出した線虫の形態からザイセンの有無を確認した。形態での同定が難しい場合は、材片 2 枚を用いてマツ材線虫病診断キットによりマツ材線虫病の陽性または陰性を確定した。

次に、検体がマツ材線虫病であった陽性木の場合は材片の採取ポイントを赤丸、本病でない陰性木の場合は材片の採取ポイントを白丸とし、それぞれ「1」と「0」の値を持たせ、GIS 上(ArcGIS10.6.1)にマッピングした(以下、鑑定マップとする)。各採取ポイントを頂点とする三角ポリゴンを作成し、その重心に重心ポイントを発生させ、3 頂点の鑑定値の合計を属性として与えた。その重心ポイントの合計値を用いて IDW 法(Inberse distance weighting)で内挿補間を行い、等値線を作成して等値線の閾値 0~1, 閾値 1~2, 閾値 2~3 の区分を白色から濃灰色に段階的に着色し、未被害地を示す白色と被害地を示す灰色の境目を被害先端ラインとして推定した。さらに標高 800~899m を黄緑色、標高 900m 以上を緑色として着色し図示した。

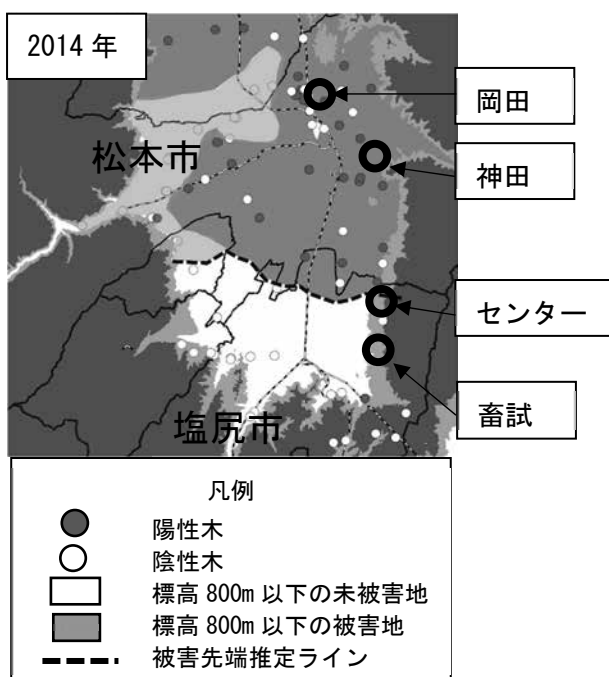


図-4 アカマツ枯損木位置と被害先端推定ライン

(2) 結果と考察

2014 年時点のアカマツ枯損木位置と被害先端推定ラインを図-4 に示す。2016 年の松本市内では多くの枯損木がマツ材線虫病の陽性となり、被害先端ラインは塩尻市に入っていると推定された。この時点で松本市岡田下岡田(以下、岡田)では本病が集団的

に発生し、松本市神田(以下、神田)では被害が単木的に継続発生していた。また、被害先端地と推定された塩尻市片丘南内田にある林業総合センター(以下、センター)被害が単発的に発生し、それより南に位置する塩尻市片丘南熊井にある畜産試験場(以下、畜試)では未被害であったことから、概ね実態に即していると考えられた。

3-2 被害の程度別媒介昆虫の生息状況と保持線虫種

(1) 方法

3-1 の結果をもとに、岡田、神田、センター、畜試にそれぞれ 30m×30m の調査プロットを設定した(表-3)。調査プロット内のアカマツを対象に枯損木調査を行った。アカマツの枯死判定は、樹冠全体の葉が赤色になったもの、あるいは変色途中のもので、小田式樹脂流出調査法によりヤニの滲出に異常のあるものとした。枯死判定されたアカマツについて、3-1 と同様の方法で材片を採取し、ザイセンの有無を確認した。調査期間は 2014 年 7 月から 2017 年 12 月までとし、月に一度枯損調査を行なった。また、ここでは当年成虫の影響が考えられる 8 月初旬から 11 月末までに枯死した個体を当年枯れアカマツ、寒冷地特有で被害が遅れて発生する 12 月初旬から翌年の 7 月末までに枯死した個体を年越し枯れアカマツとし、その割合を比較した。

また、各調査地周辺において、2 と同じ方法で作成したおとり丸太を 0.1m³になる本数で平置きした。調査期間は 2015 年および 2016 年の 5 月下旬から 7 月上旬までとし、2 週間に 1 度、おとり丸太に飛来した媒介昆虫を捕獲し、雌雄、体長、体重を記録した。また、捕獲した媒介昆虫を解剖し、ベールマン法により 48~72 時間以内に線虫を抽出してシラキュース時計皿上で計数した。線虫の同定は、2 の方法 b によりザイセンとニセマツの有無を確認する方法とし、林木育種センター九州育種場において

行なった。

(2) 結果と考察

各調査プロットのアカマツ累積枯損率の推移を図-5に示す。調査プロット設置時点では、各プロットとも枯死木はなかった。岡田プロットでは、2014年8月にプロット内で最初の被害が発生し、枯損率は2014年末で1.2%、2015年末に14.6%、2016年末に31.7%、2017年末に53.7%となり、年々枯損率の増加が顕著となった。岡田プロットから直線距離で約6.8km離れた神田プロットでは、2016年に最初の被害が発生し枯損率は8.3%だったが、2017年10月には12.5%となった。センタープロットと畜試プロットでは調査期間中の被害の発生はなかった。以上から、防除を行わない場合は被害初期において年々被害率を増加させながら拡大することが示唆された。また、岡田から南下した被害は、2年後には神田に到達し、神田は岡田と同様の被害推移をたどる可能性があった。

また、岡田プロット内の時期別アカマツ枯損木本数を表-4に示す。当年枯れ本数(当年枯れ率)は2014年1本(12.5%)、2015年に4本(33.3%)、2016年に6本(60.0%)、2017年に14本となり、被害が激害化するほど当年枯れ被害木の割合が大きくなった。一方、12月から翌年7月に枯れた年越し枯れ本数は2014年から2015年にかけて7本、2015年から2016年にかけて8本、2016年から2017年にかけて4本となり、各年で一定の変化はなかった。これらのことから、標高780mの岡田調査地においては、増加した当年枯れ木が媒介昆虫の繁殖元となり、増加した媒介昆虫成虫によって、加速的に枯損率が増加したと推測した。これまで被害を効果的に防除できるとされてきた標高800m付近(岡田・小山 2006)においても、被害のごく初期段階で当年枯れ被害木を中心に防除を徹底することが後の被害拡大を回避するために重要であること、一方で激害化した林分ほど防除が困難になることが推察された。また、被害の発生初期は年越し枯れ木が多く発生した。長野県内の高標高地のような冷涼な気候においては、線虫に感染していても外見上健全に見える潜在感染木が、当年枯れ時期後に枯死の病徴となって表れるいわゆる「年越し枯れ」被害が発生する(小島ら 1987, 1993)が、線虫感染の翌年に枯死した木では感染源としての役割が小さい可能性

があり(前原ら 2015)、防除の優先は当年枯れ木と考えられる。しかし、枯死木を完全に除去しても残っている潜在感染木がマダラを誘引することで被害が再発する可能性があり、松くい虫被害防除の盲点(二井 2017)となるこれらの年越し枯れ木を含めた潜在感染木は、媒介昆虫が羽化する直前までに徹底した伐倒処理が必要である。

次に、おとり丸太により捕獲した媒介昆虫の体内線虫種を表-5に示す。本調査期間中にはセンターと畜試でカラフトのみが計4頭捕獲され、マダラは捕獲されなかった。これは、調査期間である5月下旬から7月上旬がマダラの産卵期間より早かったためと考えられる。捕獲したカラフトを解剖した結果、センターで捕獲したカラフトのオスの体内からはザイセンとニセマツの両方が検出された。また、2015年に畜試で捕獲したカラフトのメスの体内からは数頭のザイセンが検出された。これらのことから、被害が単発的に発生している被害先端地から未被害地にかけてはカラフトがザイセンを保持することが明らかとなり、カラフトが本病を媒介する可能性があった。一方、カラフト体内の線虫密度は低かった。この理由として、性成熟しおとり丸太に飛来する前の後食時にすでに多くの線虫が離脱したことや羽化脱出時の保持頭数が少なかったことが考えられるが、本調査の結果からは不明であった。また、過去にカラフトの捕獲記録のあった岡田では捕獲されなかったことから、被害の進行とともにマダラが増加するとカラフトが駆逐される過去の研究事例と同様の現象が松本地域でも起きている可能性があった。

表-3 各調査地の概要

調査地	標高(m)	林況(アカマツ)			
		調査区内立木本数	立木密度(本/ha)	平均胸高直径(cm)	平均樹高(m)
岡田	780	84	930	24.5	25
神田	630	25	270	36.6	25
センター	880	66	833	41	25
畜試	800	75	733	15	12

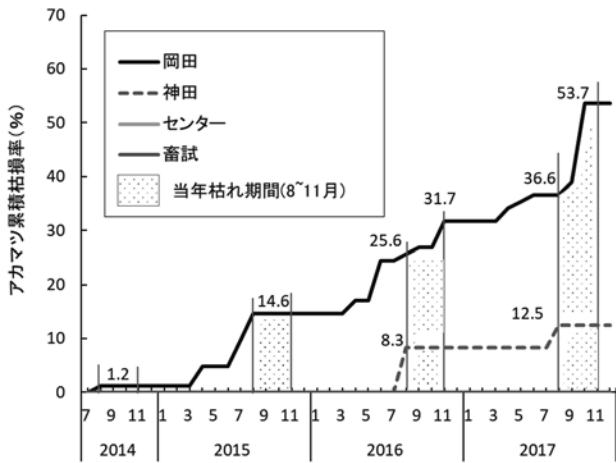


図-5 調査地別アカマツ累積枯損率の推移

表-4 岡田における時期別アカマツ枯損木本数

Year	当年枯れ本数	年越し枯れ本数	当年枯れ率 (%)
2014	1	7	12.5
2015	4	8	33.3
2016	6	4	60.0
2017	14	—	—

表-5 カラフトの体内線虫種 (Bx: ザイセン, Bm: ニセマツ)

調査地	捕獲日	種	媒介昆虫		線虫			
			雌雄	体長(mm)	体重(g)	Bx	Bm	密度(頭/ホトリ頭)
センター	2015/6/17	カラフト	オス	9.4	0.11	+	+	190
畜試	2015/7/2	カラフト	メス	9.1	0.08	+	-	極少
畜試	2015/7/2	カラフト	メス	10.2	0.13	-	-	0
畜試	2016/6/15	カラフト	メス	10.7	0.12	-	+	極少

3-3 標高別被害と媒介昆虫の生息及び保持線虫種

(1) 方法

標高別のアカマツ枯損率の推移を把握するため、標高800mより低標高域で被害が激害化している松本市里山辺および三才山地籍内(以下、松本市本郷)のアカマツ林のうち、標高1,400m付近までアカマツ林が連続している林分を選定し、標高800m, 1,000m, 1,200m, 1,400m地点にそれぞれ30m×30mの方形プロット調査区(以下、標高別に800m, 1,000m, 1,200m, 1,400mと略記)を設けた(表-6)。調査期間は2018年5月から2022年3月までとし、各年4月から12月までの毎月、プロット内のアカマツ枯損率を調査した。プロット内で枯死木がない場合は、プロット周辺半径50mを目安に目視調査し、枯死木を記録した。また、3-1の調査と同様に枯死木から材片を採取し、ベールマン法またはマツ材線虫病診断キットによりザイセンの有無を調査した。

また、野外に生息する媒介昆虫を誘因捕獲するた

め、3-2と同じ方法でおとり丸太を作成した。各調査区内に、1箇所あたりおとり丸太0.1m³を3箇所に約50m離してアカマツ林樹冠下に設置した。調査時におとり丸太に飛来していたカミキリ種を全て捕獲し、その種の同定を行なった。捕獲した媒介昆虫は解剖してベールマン法により体内線虫を抽出した。線虫の同定は2と同じ方法により、ザイセンとニセマツ等の有無を確認する方法とした。おとり丸太は2018年から2021年の各年5月下旬に作成および設置し、媒介昆虫の捕獲調査は各年6月上旬から7月中旬まで週に一度の頻度で計7回行なった。なお、捕獲調査は松本広域森林組合、松本市本郷財産区及び松本地域振興局林務課の協力により行った。

(2) 結果と考察

標高別調査プロット内のアカマツ枯損率の推移を図-6に示す。800mでは調査開始時の2018年5月の枯損率は7.4%であったが、年々枯死木が増加し、2021年8月には87.0%となった。また、1,000mでは2021年5月に年越し枯れと考えられる1本が初めて枯死し、被害率が3.8%となった。周辺アカマツを含め、1,200mと1,400mでは、アカマツは枯死しなかった。1,000mは800mに比べ枯損率の上昇幅が小さく、標高が高いほど被害木増加速度は遅いと考えられた。

また、周辺アカマツを含む800mと1,000mの時期別アカマツ枯損木本数を表-7に、標高別の材線虫病率(陽性率)を表-8に示す。マツ材線虫病率は1,000mが800mに比べ低い傾向があり、特に被害の発生初期に低かった。この原因として、標高が高いほど本病に罹患しにくいことや樹体内の線虫の増殖が抑えられていることなどが考えられた。なお、標高の違いによる当年枯れ率に差は見られなかった。

2018年から2021年までの媒介昆虫の標高別野外捕獲調査結果をカラフトについては図-7に、マダラについては図-8に示す。期間中カラフトは1,000mと1,200mで同数捕獲された。一方、マダラは800mで最も多く、標高が高くなるにつれ捕獲頭数が少なくなった。いずれの媒介昆虫も1,400mでは捕獲されなかった。マダラの捕獲頭数が多かった2018年は標高1,200mでも捕獲されたが、その数はわずかであり、高標高ほどマダラは少なくカラフトが生息し

ていると考えられた。

野外捕獲した媒介昆虫の保持線虫種を表-9に示す。カラフトは線虫保持率が低く、ザイセンを保持した個体は捕獲されなかった。一方、マダラは標高1,000m以下では線虫を保持することが多く、ザイセンの保持率は21.4%~100%で、最大10,133頭のザイセンを保持したマダラがあった。

以上から、標高1,000m以下では主にマダラがザイセンを媒介しており、本病媒介者としての役割が大きいと考えられる。また、2020年に1,000mで捕獲したカラフト1頭からはニセマツが検出された。このことは、標高が高く被害が微害のうちニセマツを持つカラフトが存在することを示しているが、同標高ではザイセンを保持したマダラが多く捕獲されており、被害の拡大とともにカラフト-ニセマツの系からマダラ-ザイセンの系に置換されつつあると考えられた。カラフトがマダラに置き換わる前には

カラフトがザイセンを保持することがあることから、今後、マダラの生息の少ない標高1,200m以上に被害が拡大した場合の被害木から羽化脱出した媒介昆虫が保持する線虫種や密度を調査する必要がある。

また、各媒介昆虫の標高別捕獲頭数と当年枯れ本数の関係を図-9に示す。マダラの捕獲頭数と当年枯れ本数の間に相関係数 $r=0.50$ で正の相関がみられた(スピアマン順位相関係数検定, $p<0.05$)。このことから、マダラの生息頭数が多いほど当年枯れ本数が増加すると言えた。一方、カラフトの捕獲頭数と当年枯れ本数の間には相関関係がみられないことから、当年枯れ本数の増加に寄与しているとはいえない。しかし、当年枯れ本数が多い800mでは、すでにカラフトが駆逐されマダラに置き換わっていると考えられるため、置き換わる前の詳細な調査が必要である。

表-6 標高別調査区の概要

調査区	位置		林況				プロット周辺の状況			
	所在	標高(m)	調査区内アカマツ立木本数	立木密度(本/ha)	平均胸高直径(cm)	上層木平均樹高(m)	アカマツ以外の上層木樹種(本数)	下層木(本数)	被害の有無	周辺の防除有無
800m	松本市里山辺	800	54	600	38.4	26.0	なし	コナラ(2)、ミズキ(2)	あり	一部伐倒くん蒸処理(2020年3月から)
1000m	松本市三才山	1,000	26	289	43.9	24.7	なし	コナラ(2)、クリ(1)、ホオノキ(1)	あり	一部伐倒くん蒸処理(2020年4月から)
1200m	松本市三才山	1,200	58	644	30.4	22.6	カラマツ(1)	クリ(1)、ミズナラ(1)、ウリハダカエデ(1)など	なし	なし
1400m	松本市三才山	1,400	54	600	36.2	23.2	なし	クリ(1)、ミズナラ(2)、アオダモ(1)など	なし	なし

表-7 時期別アカマツ枯損木本数(上:800m, 下:1000m)

	当年枯れ本数	年越し枯れ本数	当年枯れ率(%)
2018	3	3	50.0
2019	6	9	40.0
2020	8	11	42.1
2021	2	-	-
	当年枯れ本数	年越し枯れ本数	当年枯れ率(%)
2018	3	5	37.5
2019	0	0	-
2020	3	3	50.0
2021	6	-	-

表-8 標高別材線虫病率(カッコ内は周辺アカマツ)

年	材線虫病率(%)			
	800m	1000m	1200m	1400m
2018	75.0%	- (33.3%)	-	-
2019	77.8%	- (60.0%)	-	-
2020	94.1%	- (66.7%)	-	-
2021	69.2%	100% (88.9%)	-	-

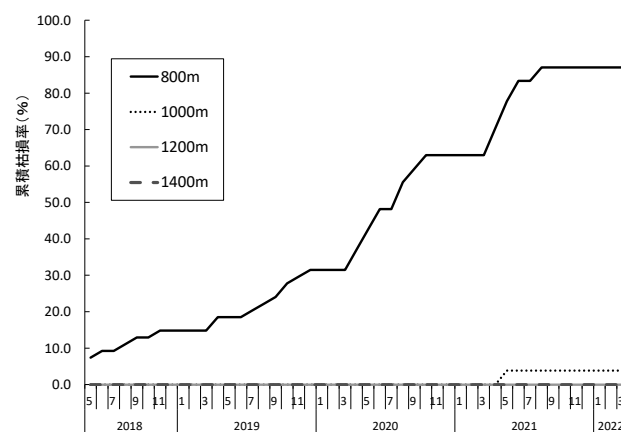


図-6 標高別調査区内のアカマツ枯損率の推移

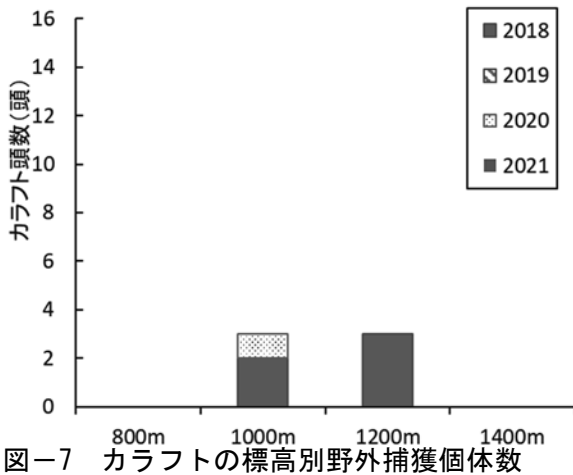


図-7 カラフトの標高別野外捕獲個体数

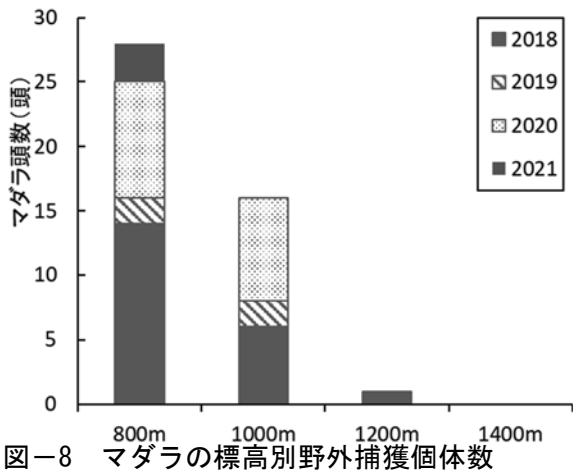


図-8 マダラの標高別野外捕獲個体数

表-9 野外捕獲した媒介昆虫の保持線虫種

年度	調査地	野外捕獲媒介昆虫 (頭)	捕獲頭数 (頭)	解剖頭数 (頭)	線虫保持率(%)					線虫頭数/1頭(個)		線虫同定方法	
					ザイセン	ニセマツ	その他	不明	線虫なし	最大	平均±SD		
2018	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	14	14	21.43	0	0	42.86	35.71	1.023	562.3±465.6	方法a	
	1000m	カラフト	2	2	0	0	0	100.00	0	0	0	方法a	
		マダラ	6	6	50.00	0	0	0	50.00	1.575	700.2±773.9	方法a	
	1200m	カラフト	3	3	0.00	0	0	0	100.00	0	0	方法a	
		マダラ	1	1	0.00	0	0	100	0	0	0	方法a	
2019	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	2	2	50.00	0	0	0	50.00	153	153.0±0	方法a	
	1000m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	2	2	50.00	0	0	0	50.00	18	18.0±0	方法a	
	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	9	9	11.10	0	0	0	88.90	10,133	10,133±0	方法b	
1000m	カラフト	1	1	0	100	0	0	0	29	29±0	方法b		
	マダラ	8	8	50.00	0	0	0	50.00	1,133	566.8±549.9	方法b		
2021	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	3	2	100.00	0	0	0	0	95	48.5±46.5	方法b	

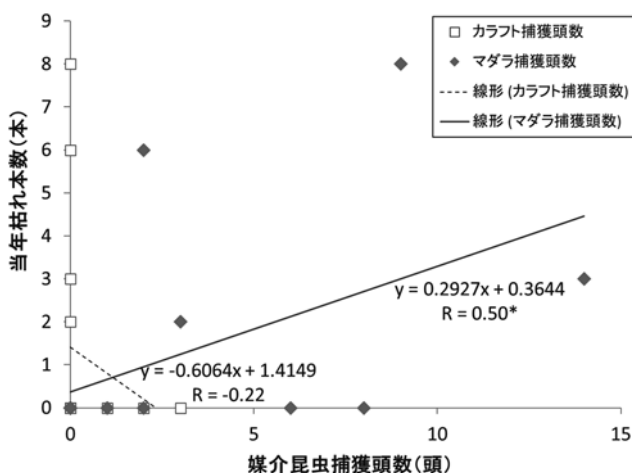


図-9 媒介昆虫捕獲頭数と当年枯れ本数の関係

3-4 標高別被害木から羽化脱出する媒介昆虫種と保持線虫種

(1) 方法

3-3 の 800m と 1000m のプロット内外において発生した本病被害木から羽化脱出する媒介昆虫を捕獲するため、各年のザイセンが検出されたアカマツを枯死翌年度の4月に標高別に2本ずつ伐倒し、幼虫の痕跡であるフラスが見られる枝や幹を当センター構内の昆虫網室に枯死木別に保管した。調査対象木は2018年から2020年の間に枯れ、ザイセンの検出された当年枯れ木とした。翌年発生した媒介昆虫を全て解剖し、ベールマン法により48~72時間以内に線虫を抽出した。線虫の同定方法は、2章の方法bとした。

(2) 結果と考察

標高別被害木からの羽化脱出種と保持線虫種を表-10に示す。各年とも2本中1本から媒介昆虫が羽化脱出した。2018年の800m被害木からは、カラフトとマダラの両種が羽化脱出したが、線虫は保持していなかった。一方、1000m被害木からはカラフトのみが羽化脱出し、体内からザイセンが検出された。2019年の800m被害木からはマダラのみが羽化脱出し、ザイセンが検出された。また、1000mではカラフトとマダラの両種が羽化脱出し、カラフトは解剖前に死亡したため線虫の検出ができなかったが、マダラ体内からはザイセンが検出された。2020年の800m被害木からはマダラのみが羽化脱出し、体内から最大3万頭を超えるザイセンが検出された。

800mでは、カラフトは2018年被害木から羽化脱出したが2019年以降は羽化脱出しなかったこと、また、1000mでは、マダラは2018年被害木からは羽化脱出しなかったが2019年被害木から羽化脱出したことから、800mではカラフトがマダラに置換され、1000mにまでマダラが生息を拡大していることが推測された。また、1頭のカラフトはマダラに置換する前にはザイセンを保持していたが、保持頭数は43頭と少なかった。以上より、標高1000m付近までは、マダラに置換する前はカラフトがザイセンを保持して羽化脱出するが、その保持頭数は少なく、また、被害の増加とともにマダラに置換するため、カラフトの本病媒介者としての役割は小さいと考えられた。一方で被害初期段階ではカラフトが媒介

する可能性は否定できない。今後は、マダラの出現が制限されるさらに高標高地で被害が発生した場

合の被害木から羽化脱出する媒介昆虫種と保持線虫種を調査する必要がある。

表-10 標高別被害木からの羽化脱出種と保持線虫種

年度	調査地	羽化脱出媒介昆虫	捕獲頭数(頭)	解剖頭数(頭)	線虫保持率(%)					ザイセン頭数(頭/カキリ1頭)	
					ザイセン	ニセマツ	その他	不明	線虫なし	最大	平均±SD
2018被害木	800m	カラフト	1	1	0	0	0	0	100.0	-	-
		マダラ	3	1	0	0	0	0	100.0	-	-
2019羽化脱出	1000m	カラフト	2	1	100.0	0	0	0	0	43	43±0
		マダラ	0	-	-	-	-	-	-	-	-
2019被害木	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	1	1	100.0	0	0	0	0	3,783	3,783±0
2020羽化脱出	1000m	カラフト	1	0	-	-	-	-	-	-	-
		マダラ	2	2	100.0	0	0	0	0	1183	478±525
2020被害木	800m	カラフト	0	-	-	-	-	-	-	-	-
2021羽化脱出		マダラ	62	9	88.9	0	0	0	11.1	30,500	10,348±10,752

※マイナス符号:媒介昆虫捕獲なし

4 カラフトヒゲナガカミキリの影響の検討

2章, 3章の結果から, ①カラフトはもともと県内の広域に分布していること, ②マツ材線虫病被害が拡大するとカラフトがマダラに置き換わること, ③被害先端地や高標高地において被害が隣接する箇所では新鮮なアカマツ細丸太を野外に放置した場合, 翌年その丸太からザイセンを保持したカラフト成虫が羽化脱出することがあること, ④マダラに置き換わる前の被害先端地や高標高地では, ザイセンを保持したカラフト成虫が出現することが分かった。ここでは, 標高別に媒介昆虫の越冬試験を行い媒介昆虫の生息範囲を推定するとともに, 3-2と3-3で示した被害が水平方向や高標高側へ拡大する先端地の被害状況とザイセンを保持したカラフトの生息情報から, カラフトが被害拡大に及ぼす影響について考察した。

4-1 標高別媒介昆虫の越冬試験

(1) 方法

3-2と同じ方法で作成した丸太に, シャーレ上で孵化させたカラフトまたはマダラの1齢幼虫を10頭ずつ接種した。接種は, 彫刻刀を用いて10cm間隔で直径2cmほどアカマツ丸太の樹皮を剥ぎ, 内樹皮下に空間を作って幼虫を入れ, 樹皮で蓋をした。接種した丸太は, 羽化脱出成虫を捕獲できるように個別に金網で覆った(以下, 試験丸太)。試験丸太は3-1と同じ標高別4調査地のアカマツ林樹冠下に設置し越冬させた後, 翌年の春に回収して, 当センター構内の昆虫網室に保管し, 羽化脱出直後にすべての成虫を捕獲した。越冬試験は表-11のスケジュールに沿って, 2018年から2021年までに二回行った。

一回目は2018年8月に, 二回目は2019年10月に標高別調査地に設置し, それぞれ翌年4月に回収して, 羽化脱出種を捕獲後, 二年一化の個体を調査するため, 10月に再設置し, 翌々年に同様の羽化脱出調査を行った。

(2) 結果と考察

標高別媒介昆虫の越冬後羽化脱出頭数を図-10に示す。カラフトは一回目, 二回目ともに標高1,400mにおいて全ての幼虫が越冬し, 一年一化で成虫が羽化脱出した。一方, マダラは標高が上がるほど一年一化個体が減り, 標高1,400mで越冬し羽化脱出した個体は一回目で1頭, 二回目で0頭であった。二冬越しで成虫となる二年一化個体は, カラフト, マダラとも標高1,200m以上で出現し, マダラで多かった。

これらのことから, カラフトは今回の試験標高帯ではその気温制限を受けずに世代交代すると推察された。一方, マダラは標高が上がり気温が低いほど幼虫が十分成長できないことや越冬時に死亡することが推測され, 本病媒介のリスクが高いとされる一年一化個体の出現が限定されると言えた。しかし, 1,400mでもわずかにマダラ成虫が出現したことから, 産卵された丸太の状態や丸太周囲の環境などの条件によっては, 標高1,400mでもマダラは世代交代する可能性があることが示唆された。今後は, ザイセンの入った丸太を用いて, 各標高においてザイセンを保持した各媒介昆虫が羽化脱出するかを実験的に調べる必要がある。

表-11 越冬試験調査スケジュール

一回目

年度	2018年度									2019年度									2020年度								
月	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
丸太現地設置	■														■												
標高別越冬		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
丸太回収																											
羽化脱出調査																											

二回目

年度	2019年度						2020年度						2021年度												
月	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
丸太現地設置	■												■												
標高別越冬		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
丸太回収																									
羽化脱出調査																									

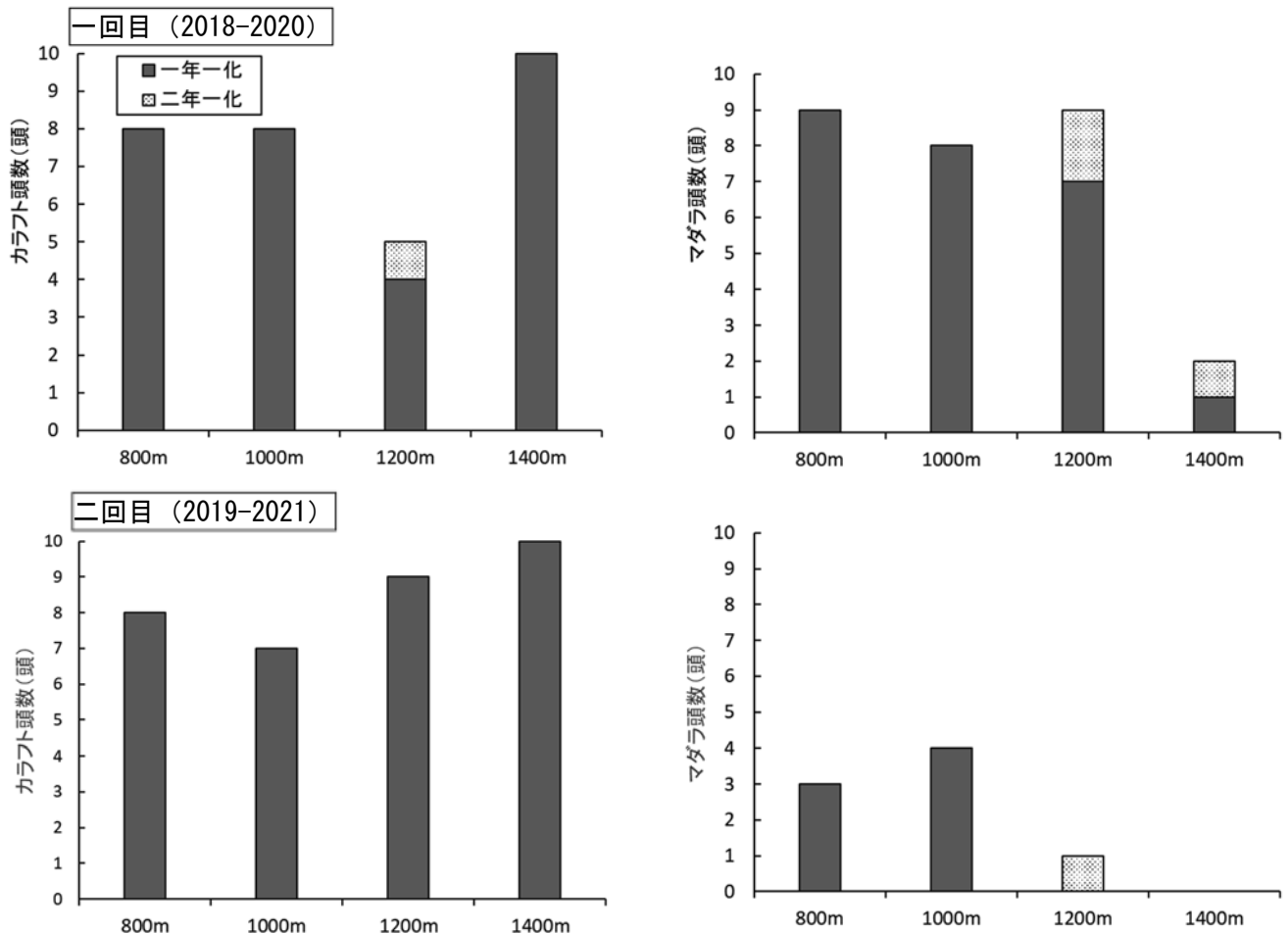


図-10 標高別媒介昆虫の越冬後羽化脱出頭数 (左:カラフト, 右:マダラ)

4-2 ザイセンを保持したカラフトの出現地予測

(1) 方法

マダラに置き換わる前の被害先端地や高標高地では、ザイセンを保持したカラフト成虫が出現することから、被害先端地を把握することでその生息地

が推定できると考えられる。ここでは標高 800m 以下の平面的被害の拡大地域において、ザイセンを保持したカラフトの出現位置を予測するため、3-1の方法により作成したアカマツ枯損木位置と被害先端推定ラインについて、2013~2017 年度までの鑑

定情報を用いてマッピングした。その推定ラインの推移から標高 800m 以下における被害の平面的拡大速度について検討した。

(2) 結果と考察

2017 年の激害地以外のアカマツ枯損木位置と被害先端推定ラインを図-11 に、被害先端推定ラインの推移を図-12 に示す。松本地域のマツ材線虫病被害は、北から南に向かって拡大し、2014 年には面的被害が塩尻市にも入ったと推定された。2017 年には被害先端推定ラインは塩尻市に隣接する岡谷市との境付近に到達し、2018 年には岡谷市で初被害が発生したことから、この推定ラインは概ね実態と整合していると考えられる。また、標高 800m 以下では概ね年間 3km 程度の速度で被害が拡大すると予測された。ザイセンを保持したカラフトは被害先端推定ライン付近に出現すると予測されるが、標高 800m 以下の低標高側ではその出現期間は短いと考えられる。

一方、4-1 および 3-3 の結果から、標高 1,400m 付近までは標高の制限なくカラフトが繁殖できることに加え、高標高地へ向かうほど被害の拡大速度が遅くなると推測されることから、標高 1,000m を超える高標高地の被害先端地においては、ザイセンを保持したカラフトが出現する可能性があり、その出現期間が比較的長いと推測できる。標高 1,000m ではすでにマダラに置き換わりつつあることを考慮すると、標高 1,000m 以下ではマダラを防除ターゲットとし、標高 1,200m 以上ではカラフトによる本病媒介の可能性が考えられるため、ザイセンを保持したカラフトの生息状況を見極めつつ防除にも配慮すべきである。

5 結言

本報告では、被害先端地や標高 800m を超える高標高地におけるマツ材線虫病被害の推移と媒介昆虫種を把握することを目的とし、冷涼な気候でも生息できるカラフトの県内分布や保持線虫種を調査するとともに、被害が激害化している松本地域における媒介昆虫種とその保持線虫種等の解明から、主な媒介昆虫種の推定を試みた。

調査の結果、カラフトは県内の広域に生息分布していた。また松本地域におけるザイセンを保持したカラフトが出現した条件は下記のとおりであった。

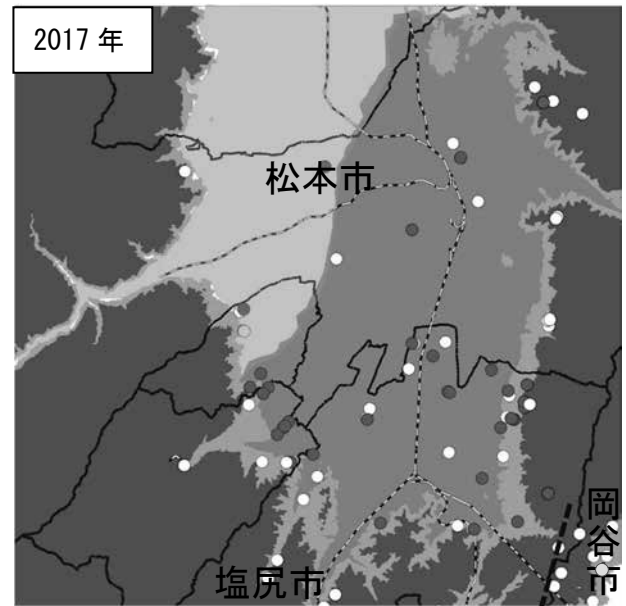


図-11 アカマツ枯損木位置と被害先端推定ライン

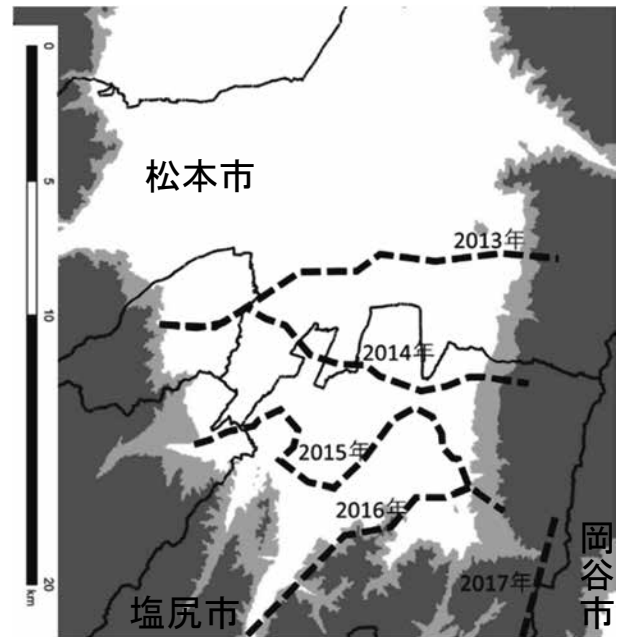


図-12 被害先端推定ラインの推移

- ① 標高800m程度かつ媒介昆虫がマダラに置き換わる前の被害先端地
 - ② 標高1,000m程度までの高標高地かつ被害が近接している地域で、更新伐等により発生した直径2～16cmの細丸太を放置し、カラフトの産卵元となった場合
 - ③ 標高1,000m程度の高標高地で発生したマツ材線虫病陽性木を放置し、カラフトの産卵元となった場合
- ①や③の条件に当てはまる標高800mの被害先端地で野外捕獲したカラフトや標高1,000mで発生し

た枯死木から羽化脱出したカラフトは、ザイセンを保持していたがその保持頭数は少なかった。また、これらの標高帯では被害の進行とともにカラフトがマダラに短期間で置換した。さらに標高1,000m以下では、マダラがザイセンを保持する割合が高いうえに保持頭数も多く、またマダラの生息頭数が多いほど当年枯れ本数が増加していたことから、標高1,000m以下ではマダラは本病媒介者としての役割が大きいと考えられた。

一方、カラフトは少なくとも標高1,400m付近までは標高の制限を受けることなく繁殖できることに加え、被害の拡大速度とマダラへの置換は高標高地へ向かうほど遅くなると推測されることから、高標高側の被害先端地ではザイセンを保持したカラフトが継続的に出現する可能性があった。

被害が増加している標高1,000mでは、すでにマダラに置き換わりつつあることを考慮すると、標高1,000m程度まではマダラを防除ターゲットとし、マダラの生息しにくい標高1,200m以上ではカラフトによる本病媒介の可能性が考えられるため、被害木の発生やザイセンを保持したカラフトの生息状況を見極めつつカラフトの防除にも配慮すべきである。今後は、マダラの世代交代が制限されると考えられる標高1,200m以上で被害が発生した場合の被害木から羽化脱出する媒介昆虫種や保持線虫種等を調査する必要がある。

6 謝辞

本調査にあたり、調査地を提供いただいた松本市岡田財産区、本郷財産区、松本市森林環境課、県畜産試験場の皆様、また各種調査にご協力いただいた南佐久北部森林組合、上小森林組合依田窪支所、松本広域森林組合松本支所、山仕事創造舎、長野森林組合更埴支所、佐久穂町役場、長和町役場、富士見町役場、箕輪町役場、喬木村役場、上松町役場、大町市役所、千曲市役所の関係者の皆様、並びに各地域振興局林務課の皆様、また、線虫の抽出・同定にご協力いただいた(国研)森林総合研究所東北支所の相川拓也生物被害研究グループ長、および小澤壮太研究員、(国研)森林総合研究所林木育種センター九州育種場の松永孝治育種研究室長に対し、この場を借りて深く感謝申し上げます。

引用・参考文献

- 相川拓也・神崎菜摘・菊池泰生 (2010) マツノザイセンチュウのDNAを利用した簡易なマツ材線虫病診断ツール”マツ材線虫病診断キット”について. 森林防疫 59(2):60-67
- 岡田充弘・小山泰弘 (2006) 松くい虫激害地の被害拡大現状に関する研究-マツ材線虫病被害の被害減少要因の検討-. 長野県林業総合センター研究報告 21:1-9
- 小島耕一郎・奥村俊介 (1987) 寒冷地方におけるアカマツ枯損動態に関する研究. 長野県林指研究報告第2号:21-36
- 小島耕一郎 (1989) カラフトヒゲナガカミキリ山林火災跡地に異常発生 長野県林総セ技術情報 70:1-4
- 小島耕一郎・唐澤清・岡田充弘 (1993) マツ枯損の激化抑止技術. 長野県林業総合センター研究報告第7号:41-74
- Matsunaga & Togashi (2004) A simple method for discriminating *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* by species-specific polymerase chain reaction primer pairs. *Nematology* 6 (2): 273-277
- 佐藤平典ら (1987) カラフトヒゲナガカミキリによるマツノザイセンチュウの媒介能力に関する試験. 日林誌 69(12):492-496
- 槇原寛 (1997) 媒介昆虫の種類と世界史, In 全国森林病虫獣害防除境界編, 松くい虫 (マツ材線虫病) -沿革と最近の研究-, 協文社:44-64
- 二井一禎 (2017) 潜在感染木とマツ枯れ防除戦略. 森林防疫 66(2):9-16
- 柳澤賢一・小澤壮太・相川拓也 (2019) 長野県内におけるカラフトヒゲナガカミキリの分布と保持線虫種. 中部森林研究 67:49-50
- 前原紀敏・相川拓也・神崎菜摘 (2015) マツノザイセンチュウの潜在感染木における病徴進展とマツノマダラカミキリによるそれらの木の利用の関係. 森林防疫 64(3)708:20-24
- 長野県林務部資料 (2022) 森林被害報告
- Shin SC (2008) Pine Wilt Disease in Korea. In: Zhao, B.G., Futai, K., Sutherland, J.R., Takeuchi, Y. (eds) Pine Wilt Disease. Springer, Tokyo:26-32