

北海道における積雪を考慮したカシノナガキクイムシ越冬可能性の推定

和田尚之*・内田葉子*・雲野 明*・大井和佐*・徳田佐和子**

Estimation of the hazard of overwinter survival of *Platypus quercivorus* considering snow depth in Hokkaido

Hisayuki WADA*, Yoko UCHIDA*, Akira UNNO*, Nagisa OI*, Sawako TOKUDA**

要旨

ブナ科樹木萎凋病（以下、ナラ枯れ）はカシノナガキクイムシ（以下、カシナガ）の媒介する病原菌によって引き起こされるミズナラなどの枯損被害である。北海道でも2023年に初めてナラ枯れが確認され、蔓延防止のために早急にナラ枯れ発生の危険性を評価する必要がある。寒冷地では、冬期の低温が樹幹内部で越冬するカシナガの生存率に大きく影響するため、本報では渡島半島を対象に樹幹内部の氷点下日数を気象データ（外気温及び積雪）から予測し、カシナガが越冬可能な地域を推定した。冬期の樹幹内部温度を計測した結果、地上高0 cmでは地上高40 cmよりも氷点下日数が有意に少なく地際付近が最も越冬に適していた。また、地上高0 cmの氷点下日数を外気温と積雪データからモデル化したところ、外気温氷点下日数と最大積雪深により 0.21 ± 5.06 日（平均±標準誤差）の精度で予測できた。このモデルからカシナガの越冬生存率を推定すると、江差町北部～知内町北部の沿岸部などで10%を超えていた。また、暖冬であった2023年度は、せたな町の沿岸部や亀田半島東部でも越冬可能性が高かったほか、2023年の被害地は越冬生存率が50%を超えており、実際に半数以上のカシナガが生存していた。このハザードマップを活用し、被害の早期予測と防除体制の整備を進め、被害の蔓延防止に向けて尽力する必要がある。

キーワード：カシノナガキクイムシ、ハザードマップ、ミズナラ、樹幹温度

はじめに

現在、ブナ科樹木萎凋病（通称、ナラ枯れ）が全国的に蔓延し、深刻な被害を引き起こしている。ナラ枯れはカシノナガキクイムシ（*Platypus quercivorus*、以下カシナガ）が媒介する病原菌（*Dryadomyces quercivorus*）によって引き起こされるナラ類やシイ・カシ類の枯死被害である（小林・上田2005、黒田2011）。カシナガのマスアタックに伴う道管の物理的破壊と孔道の伸長に伴う*D. quercivorus*の急速な感染拡大によって通水機能が阻害され、枯死に至ると考えられている（升屋・山岡2012）。被害木は紅葉前に葉が赤茶色に変色して萎凋・枯死し、地際部には穿入したカシナガが排出したフラスが堆積する。ナラ枯れの感受性には樹種間差があり、落葉性の

ナラ類、特にミズナラ（*Quercus crispula*）で感受性が高いことが知られている（小林・萩田2000、黒田2011）。北海道にはミズナラが多く分布し、家具材や床材、シイタケ栽培などの原木として利用されているほか、野生動物の餌資源としても重要な役割を果たしている。そのため、北海道でのナラ枯れ蔓延は林業・林産業のみならず森林生態系にも大きな影響を与える恐れがあり、その対策が重要である。

北海道では、青森県でのナラ枯れ被害地北上を受け、ナラ枯れ発生の懸念が高まったことから、被害監視体制を強化してきた。2020年からはカシナガの生息状況を把握するためのフェロモントラップ調査を北海道・北海道森林管理局・森林総合研究所北海道支所・道総研林業試験場の共同で松前半島を中心とした道南地域で毎年実施してきた。その結果、2020

* 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido 079-0198

** 北海道立総合研究機構林業試験場道南支場 Forestry Research Institute Donan Station, Hokkaido Research Organization, Hakodate, Hokkaido 041-0801

[北海道林業試験場研究報告 第62号 令和7年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 62, March, 2025]

年は5頭のカシナガが捕獲されたものの (Ozaki et al. 2021), 2021年及び2022年は捕獲頭数0であり, この間はナラ枯れ木も確認されていなかった。しかしながら, 2023年には17頭のカシナガが捕獲されるとともに, 松前町・福島町の5か所でナラ枯れ木が北海道内で初めて確認された (内田ら 印刷中)。北海道内でのナラ枯れの蔓延を防止するには, 被害初期段階での全被害木の確実な処理が必要である (尾崎2024)。そのためには, 被害木を見落とさないよう効率的な監視体制を構築する必要がある, 北海道内でのナラ枯れ被害の発生確率の高い地域を予測することが重要になる。

ナラ枯れの被害発生確率を評価するためには, 媒介昆虫であるカシナガが繁殖可能なハザードエリアを特定することが重要である。カシナガの繁殖に関係する要因としては, 冬期の気象条件が大きいと考えられる。カシナガは南方由来の昆虫であり, 基本的には終齢幼虫で越冬するものの温度依存的に成長を続けるため, 冬期の低温に適応できていない可能性が指摘されている (衣浦1994, 鎌田2002)。実際に, 本州の高標高域など寒冷な被害地では冬期の死亡率が高いことが分かっているほか (大橋2015, 中島・松浦2015, 江崎2008), 気温と幼虫の生存率を調べた先行研究では, 氷点下の環境で飼育することで幼虫の生存率が急激に低下することが示されている (江崎2008, 伊藤2024)。一方で, 積雪環境では雪の遮熱効果により樹幹内部の温度が外気温ほど下がらず, カシナガが越冬できる環境が増加する可能性が指摘されている (小泉ら2013)。新田ら (2023) は, ミズナラ立木の樹幹内温度はその部位よりも上に40 cm以上積雪があれば外気温の影響をほとんど受けなくなることを示している。樹幹内でも地面からの高さ (地上高) によって積雪による保温効果が発揮される期間が異なるため, 地上高によって樹幹内温度に差があると考えられる。特に, カシナガは地際付近に集中して穿入する傾向があるため (鎌田2002), 地際部の樹幹内温度の評価は重要である。樹幹内温度を外気温と積雪深, 地上高から推定することができれば, この情報をもとに, カシナガが侵入した場合にナラ枯れが蔓延する恐れのあるハザードエリアを明らかにできる可能性がある。

本研究では, 北海道内でのナラ枯れ蔓延防止に向けた被害

対策につなげるために, 気温と積雪をもとにミズナラの樹幹内温度を推定し, カシナガの越冬可能性をもとにしたナラ枯れハザードマップを作成した。カシナガの越冬可能性は伊藤 (2024) によって示されたデータをもとに, 日平均温度が氷点下となる日数 (以下, 氷点下日数) を利用してカシナガの生存率を予測することにより評価し, 2023年の被害木におけるカシナガの越冬生存率と比較することでハザードマップの精度を検証した。

材料・方法

1. 調査地

調査はナラ枯れの危険性の高い松前半島で実施した。2022年度 (2022年12月～2023年3月) は木古内町・松前町・上ノ国町の4か所で, 2023年度 (2023年12月～2024年3月) は2022年度の調査地に加えて, 松前町と上ノ国町の4か所を追加した合計8か所で実施した (表-1)。いずれの調査地もナラ類を含む広葉樹林を対象とし, 気温や積雪の勾配を設けるために標高の異なる調査地を選定した (海拔高度35 m～415 m, 表-1)。農研機構メッシュ農業気象データにおける各調査地を含む基準地域メッシュ (約1 km四方, 以下1 kmメッシュ) の氷点下日数 (日平均気温0度未満の日数) と最大積雪深の平年値 (1991年～2020年) はそれぞれ50日～94日, 75.5 cm～127 cmであった。

2. 樹幹内温度, 外気温, 積雪深の測定

樹幹内温度の測定は, 各調査地でミズナラまたはクリ1個体を対象に行った。いずれの個体も林冠を形成している個体とした。カシナガの越冬場所に近い心材部と辺材部の境界付近の温度を計測するために, 直径2.5 mmのドリルで樹幹に対して垂直に深さ5 cm～8 cm程度の穴をあけ, そこに温度センサー (おんどとりTR-52i, T & D社製) を挿入して樹幹内温度を計測した。地上高による違いを評価するため2022年度は地上高0 cm, 20 cm, 40 cmの3か所, 2023年度は地上高0 cm, 40 cmの2か所で樹幹内温度を測定し, 1個体につき樹幹の斜面上方と下方それぞれに温度センサーを設置した。温度は30分間隔で記録した。外気温は直射日光の当たらない

表-1 樹幹内温度測定地点の概況

調査地	市町村	緯度	経度	調査期間 (年度)	斜面方位	傾斜角 (°)	標高 (m)	平均氷点下 日数 (日)	平均最大 積雪深 (cm)	調査木
1	木古内	41° 42.4'	140° 22.7'	2022-2023	南西	40	50	94	110.5	クリ
2	上ノ国	41° 45.1'	140° 10.1'	2022-2023	南西	35	75	81	89.0	ミズナラ
3	松前	41° 33.1'	140° 01.6'	2022-2023	平坦地	0	35	72	75.5	ミズナラ
4	松前	41° 26.7'	140° 09.5'	2022-2023	北東	10	50	56	89.5	ミズナラ
5	上ノ国	41° 43.5'	140° 10.9'	2023	南東	30	300	96	122.5	ミズナラ
6	上ノ国	41° 44.8'	140° 05.7'	2023	南東	10	320	87	111.0	ミズナラ
7	松前	41° 34.1'	140° 02.2'	2023	東	25	415	94	127.0	ミズナラ
8	松前	41° 26.3'	140° 08.8'	2023	南	30	120	50	77.5	ミズナラ

平均氷点下日数と平均最大積雪深は農研機構メッシュ農業気象データを基に算出した。

場所の地上高1.2 m付近に設置した自然通風筒（RS1, Onset社）を用いて測定し、温度センサー（おんどとりTR-52i, T & D社製）によって30分間隔で記録した。樹幹内温度及び外気温は、測定データから日平均値を算出し、12月1日～3月31日までの氷点下日数を計算した。

積雪深は樹幹近くに設置した計測棒（スタッフ）を自動撮影カメラ（ハイクカムSP2, ハイク社製）で撮影することで測定した。計測棒は2022年度は斜面の上方と下方に1本ずつ、2023年度は中間付近に1本設置した。撮影は8時間毎に行い、1日に撮影した画像のうち、目盛りが判読できた最初の画像の積雪深をその日の積雪深とした。カメラ画像からでは、地際部の消雪日を正確に判断することができなかった。新田ら（2023）では、消雪とともに地際部の樹幹内温度が大きく日変動する結果となっていたことから、地際部の樹幹内温度の日変動が顕著になった日を消雪日とした。積雪データを基に、各地点の最大積雪深、連続積雪期間（積雪状態が連続していた最長日数）、合計積雪日数、積雪深40 cm以上の日数を算出した。

3. 樹幹内氷点下日数の推定

地上高ごとの樹幹内温度及び外気温の氷点下日数に違いがあるのか、一般化線形混合モデル（GLMM, パッケージ *lme4* (Bates et al. 2015)）により評価した。2022年度及び2023年度のデータを対象に、各測定データから算出した氷点下日数を目的変数、測定位置（樹幹内温度を測定した地上高（0 cm, 20 cm, 40 cm）及び外気温）を説明変数、誤差分布をポアソン分布、リンク関数を対数リンク関数としたモデルを作成した。また、温度の測定データは調査地ごとに対応のあるデータであるため、対応関係を表すために調査地及び調査年をランダム効果とした。尤度比検定により測定位置の有意な効果が認められた場合には、Tukey's HSD法により多重比較を行った。

地上高0 cmでの樹幹内氷点下日数について、GLMM（パッケージ *lme4* (Bates et al. 2015)）により外気温と積雪データから推定した。地上高0 cmの樹幹内氷点下日数を目的変数とし、切片を0、外気温の氷点下日数と積雪に関するパラメータ（最大積雪深、連続積雪期間、合計積雪日数、積雪深40 cm以上の日数）、それらの交互作用を説明変数、調査地点と調査年をランダム効果、誤差分布をポアソン分布、リンク関数を恒等リンク関数とした。積雪に関するパラメータは、互いに相関が強いので、モデルには1つのみを使用した。積雪パラメータごとに作成したGLMMについて総当たり法によりモデル選択し、すべての積雪パラメータのモデルの中で最も赤池情報量基準（AIC）が低かったモデルをベストモデルとして採用した。なお、選択されたモデルはVIF = 2.15であり、多重共線性がないことを確認している。いずれの解析にもR4.4.0（R Core Team 2024）を使用した。

4. ナラ枯れハザードマップの作製

地上高0 cmの樹幹内氷点下日数の推定結果をもとに、渡島半島全域の樹幹内氷点下日数を推定し、カシナガの越冬可能性からナラ枯れのハザードマップを図示した。氷点下日数の算出には農研機構メッシュ農業気象データの1 kmメッシュ気象データを使用し、11月1日から4月30日までを対象とした。これは、ハザードマップの範囲に樹幹内温度測定期間よりも長期間低温・積雪下にあると予想される高標高域を含むためである。気象データは2023年度の日平均気温と積雪深及び日平均気温の平年値（1991年～2020年）、1991年～2020年の日ごとの積雪深のデータを取得した。積雪に関するパラメータの平年値は年ごとに算出した値の1991年～2020年の平均値を用いた。取得したデータを基に、平年値と2023年度の地上高0 cmの樹幹内温度の氷点下日数を前項で求めた推定モデル式によって算出した。各氷点下日数とカシナガの越冬生存率の関係は伊藤（2024）のモデル式をもとに、以下の4段階に区分した。

氷点下日数30日以下：カシナガの越冬生存率50%以上

氷点下日数55日以下：カシナガの越冬生存率10%以上

氷点下日数80日以下：カシナガの越冬生存率1%以上

氷点下日数81日以上：カシナガの越冬生存率1%未満

同様に、取得データから外気温氷点下日数の平年値と2023年度の値も算出し、平年値と2023年度における外気温と地上高0 cmの樹幹内温度それぞれの推定結果を比較した。

5. カシナガ越冬状況の調査

ハザードマップによる予測結果検証のため、2023年のナラ枯れ被害木のカシナガ越冬状況を2024年4月中旬～5月中旬にかけて調査した。調査は被害木の見つかった5か所のうち、伐倒が可能であった4か所で行った（表-2）。各調査地での調査個体数は、Aでは株立ちの一部の幹のみが枯れている半枯れ木が2個体、Bでは3又の枯死木が1個体、Cでは枯死木が1個体、Dでは枯死木が2個体とカシナガの穿入後も生きていた穿入生存木が2個体であった。各被害木について、可能な限り地際に近い位置（地上高20 cm～30 cm）から厚さ5 cm～10 cmの円盤を採取し、内部のカシナガの生存状況を調べた。円盤の辺材部分を鉋やのみを用いて割材し、材内にいるカシナガ幼虫を採取した。採取した個体は活動が認められたものは生存、加温や刺激を加えても動きの見られなかった個体は死亡とした。採取時に鉋等によって損傷した個体は総数から除外した。カシナガの個体数は被害木ごとに集計し、生存率（生存個体 / （生存個体 + 死亡個体））を算出した。作成したハザードマップから調査木が含まれる1 kmメッシュの2023年度における外気温氷点下日数と樹幹内氷点下日数及び平年値の樹幹内氷点下日数を計算し、各個体のカシナガ生存率と比較した。

表-2 カシノナガキクイムシの越冬状況調査木

調査地	市町村	緯度	経度	DBH (cm)	状態	備考
A	松前	41° 26.6′	140° 06.2′	22.8 / 31.0	半枯れ	2又の株立ち、1株のみが枯損
A	松前	41° 26.6′	140° 06.2′	26.2 / 17.5	半枯れ	2又の株立ち、1株のみが枯損
B	松前	41° 26.6′	140° 07.8′	19.6 / 17.4 / 18.3	枯死	3又の株立ち
C	松前	41° 26.6′	140° 08.7′	42.8	枯死	
D	福島	41° 26.0′	140° 13.3′	30.5	枯死	
D	福島	41° 26.0′	140° 13.3′	37.9	枯死	
D	福島	41° 26.0′	140° 13.3′	29.2	穿入生存	
D	福島	41° 26.0′	140° 13.3′	20.1 / 22.7	穿入生存	2又の株立ち

調査個体データについては内田ら（印刷中）をもとに作成。株立ち個体については、各株の胸高直径（DBH）を併記してある。

結果

1. 測定位置別の氷点下日数

2022年度の測定位置別の氷点下日数の平均値は、地上高0 cmでは33.0日（最小-最大値：1-55日）、地上高20 cmでは63.6日（36-90日）、地上高40 cmでは76.9日（66-89日）であり地上高が高くなるにつれて氷点下日数が増えていた（図-1）。また、地上高0 cmの氷点下日数は外気温の60.8日（49-79日）の半分程度であった。2023年度においても地上高0 cm

の氷点下日数の平均が66.5日であったのに対し、40 cmでは73.9日、外気温は68.1日であり、地上高40 cmや外気温よりも氷点下日数が少なかった。統計的にも地上高0 cmは地上高20 cmや40 cm、外気温よりも有意に氷点下日数が少なく（表-3）、測定位置ごとの樹幹内氷点下日数を説明するモデルで推定された平均値では地上高0 cmで52日であり、地上高40 cm（73日）の約7割の日数であった（表-3）。また、地上高40 cmは外気温よりも有意に氷点下日数が多くなっていた。

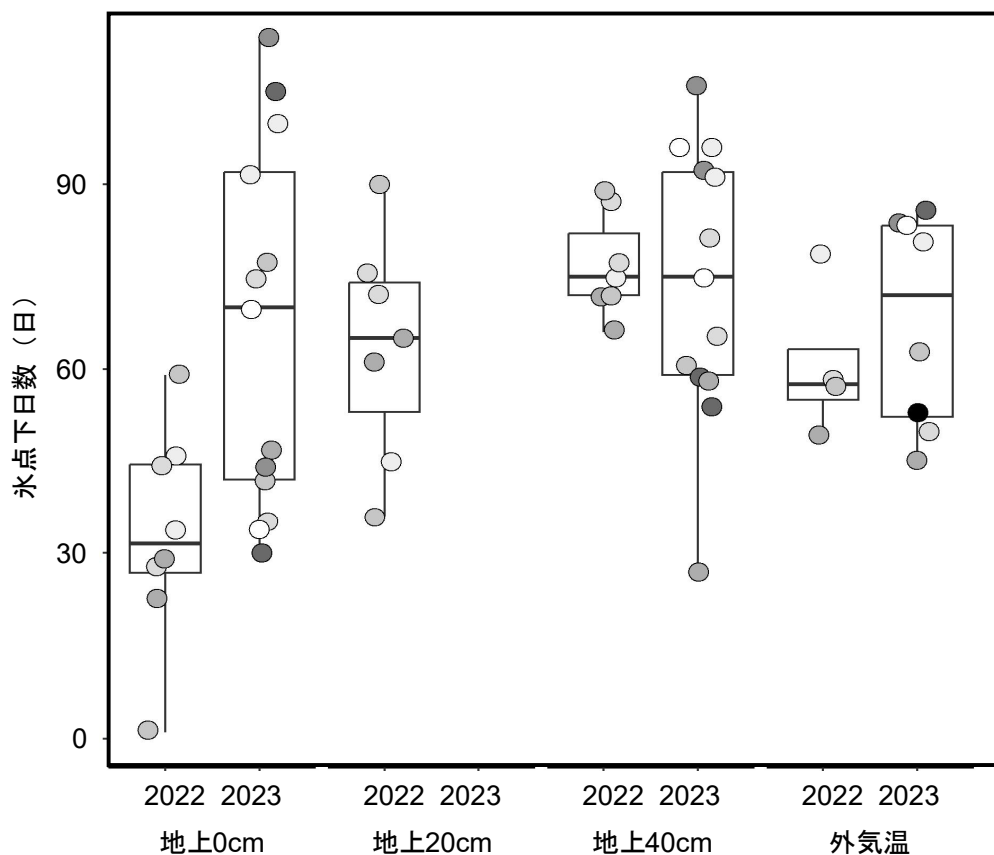


図-1 2022年度と2023年度の測定位置別の樹幹内氷点下日数
色の違いは調査地の違いを表す。

表－3 測定位置別の氷点下日数の比較結果

	係数 (±SE)	推定平均 氷点下日数
切片	3.944±0.085	
測定部位 (地上0cmを0とする)	0.000 a	52
地上20cm	0.332±0.061 bc	72
地上40cm	0.345±0.040 b	73
外気温	0.223±0.040 c	65

2年間での各調査地の測定位置間での氷点下日数を比較した一般化線形混合モデルの結果とモデルをもとにした各測定位置の平均氷点下日数の推定値。英字の違いは5%水準で有意差があることを示す。

2. 積雪深と樹幹内氷点下日数の関係

2年間の各調査地点の積雪データを見ると、最大積雪深は最小で18 cm、最大で190 cmと地点により大きなばらつきがあり、場所によっては計測期間(12月～3月)を通じて40 cm以上の積雪が一度も観測されなかった場所もあった(表－4)。また、積雪日数については、多い地点では111日と調査期間の大半が雪に覆われていた場所がある一方で、その半分程度しかない場所もあった。このデータをもとに、地上高0 cmの樹幹内温度氷点下日数を推定したところ、最大積雪深と外気温の氷点下日数を含むモデルが最もAICが低くなった(表－5)。このモデルによる地上高0 cmの氷点下日数の予測式は次のとおりである。

$$T_0 = 1.1399 \times T_{air} - 0.3321 \times S_{max}$$

T_0 : 地上高0 cmの氷点下日数, T_{air} : 外気温氷点下日数,
 S_{max} : 最大積雪深 (cm)

表－4 積雪及び気温の調査結果概要

調査年度	地上0 cm氷点下 日数 (日)	外気温氷点下 日数 (日)	最大積雪深 (cm)	合計積雪日数 (日)	根雪期間 (日)	積雪深40 cm以上 日数 (日)
2022	33.0 (1—59)	60.8 (49—79)	93.7 (36—190)	91.3 (79—111)	67.3 (44—111)	42.0 (0—106)
2023	66.5 (30—114)	68.1 (45—86)	60.6 (18—190)	83.5 (57—111)	47.4 (16—97)	17.9 (0—73)

調査年度ごとの各項目の平均値を示す。カッコ内は各年度の最大値と最小値である。

表－5 地上高0 cmの樹幹内氷点下日数推定モデル

モデル	AIC	ΔAIC
外気温氷点下日数+最大積雪深	280.1	-
外気温氷点下日数×最大積雪深	281.7	1.63
外気温氷点下日数+積雪深40 cm以上日数	283.9	3.79
外気温氷点下日数×積雪深40 cm以上日数	285.8	5.74
合計積雪日数	289.1	8.97
積雪深40 cm以上日数	290.5	10.46
外気温氷点下日数+合計積雪日数	290.8	10.67
外気温氷点下日数	291.0	10.88

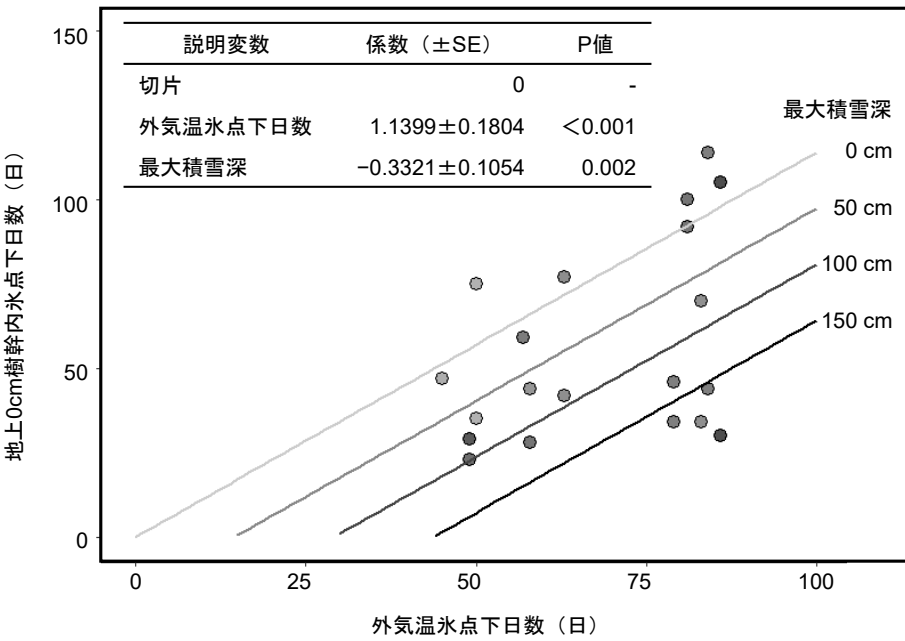
AICの小さい8モデルの結果を示す。

外気温の氷点下日数が増え、最大積雪深が少なくなるほど地上高0 cmの氷点下日数は増加すると予測された(図－2)。このモデルによる予測値と実測値の誤差は 0.21 ± 5.06 日(平均±標準誤差)であり、外気温の氷点下日数のみで予測したモデルの誤差(9.85 ± 5.52 日)よりも精度が高かった。

3. カシナガ越冬可能性の推定

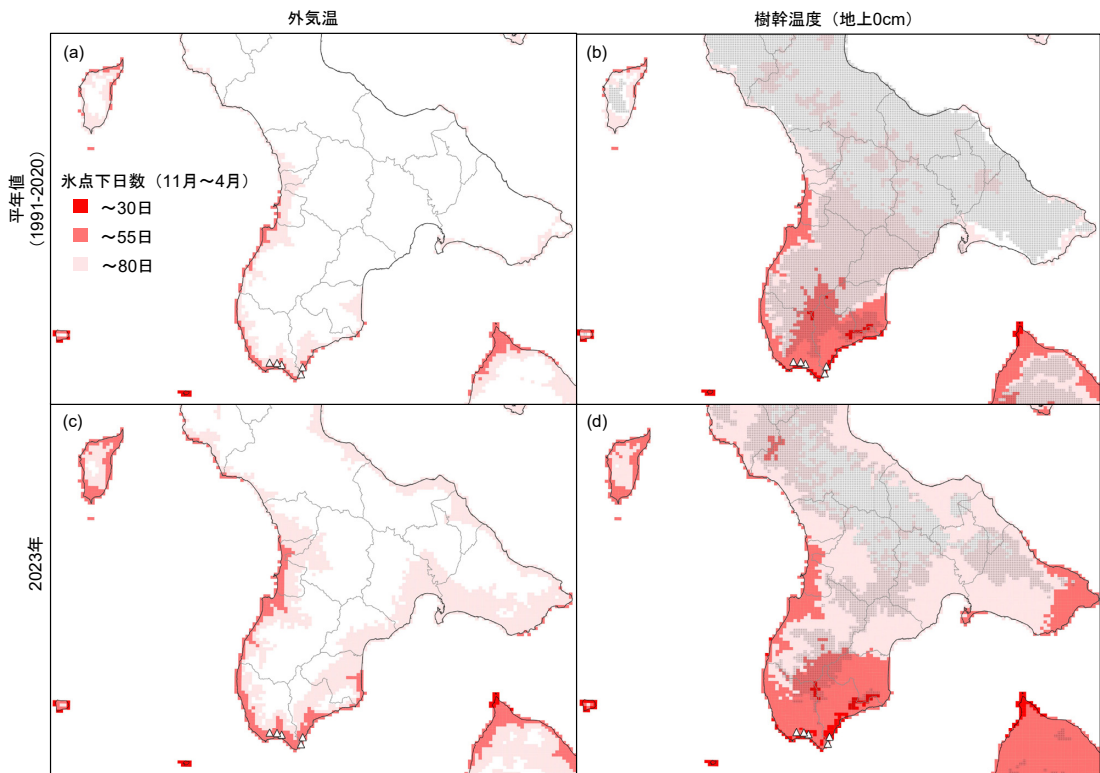
気象データ及び地上高0 cmの樹幹内氷点下日数推定モデルをもとに、1991年～2020年の平年値及び2023年度の気象データによってカシナガの越冬可能性を渡島半島でシミュレーションし、ハザードマップを作製した(図－3)。その結果、平年値、2023年度ともに外気温ではカシナガの生存率が50%以上となる氷点下日数30日以下の場所は渡島大島などの離島にしか存在しなかったが、樹幹内氷点下日数の予測値では沿岸部を中心に松前町～知内町の一部でもみられた。

地上高0 cmの樹幹内氷点下日数を見ると、カシナガの越冬生存率が10%以上となる氷点下日数55日以下の地点は、平年値では江差町北部～知内町北部の沿岸部に広がっているほか、大千軒岳南側の松前町・福島町の内陸部にも広がっていた。また、2023年度は、松前町・福島町・知内町のほぼ全域で氷点下日数55日以下となったほか、せたな町の沿岸部や、亀田半島東部にも氷点下日数55日以下の場所が点在していた。2023年度の氷点下日数55日以下の地点数は1,518メッシュに上り、平年における868メッシュの1.75倍に達していた。モデルでは、カシナガの生存率1%以上である氷点下日数80日以下の地点が松前半島の内陸部まで広域にみられた。



図－2 地上高0 cmの樹幹内氷点下日数と外気温・積雪の関係

各点は実測値であり，実線はベストモデルによる予測結果。実測値・予測結果の色の違いは最大積雪深の違いを示しており，色が濃いほど最大積雪深が深いことを示す。



図－3 渡島半島における外気温と地上高0 cmの樹幹内温度の氷点下日数推定結果に基づくハザードマップ

渡島半島における11月～4月の外気温氷点下日数 (a, c) と地上高0 cmの樹幹内氷点下日数の推定値 (b, d) を示す。(a, b) は平年値により，(c, d) は2023年度の数値により計算した結果である。各メッシュの色は濃い順に氷点下日数30日以下（カシナガ越冬生存率50%以上），氷点下日数55日以下（カシナガ越冬生存率10%以上），氷点下日数80日以下（カシナガ越冬生存率1%以上）であり，白抜きのメッシュは氷点下日数80日以上（カシナガ越冬生存率1%以下）である。(b, d) における灰色の網掛けのメッシュは気温または積雪深がモデルのレンジ外であった場所である。松前半島南部にある三角は2023年度のナラ枯れ被害地点を示す。カシナガ越冬生存率は伊藤（2024）による。

表－6 各被害木のカシナガキクイムシ越冬生存状況及び氷点下日数推定結果

調査地	状態	円盤採取高 (cm)	カシナガ越冬幼虫			外気温氷点下日数 (2023年度)	樹幹氷点下日数 (2023年度)	樹幹氷点下日数 (平年値)
			生存	死亡	生存率 (%)			
A	半枯れ	20~30	0	1	0.0	48 (17.1%)	33.1 (44.1%)	38.6 (32.4%)
A	半枯れ	20	0	11	0.0	48 (17.1%)	33.1 (44.1%)	38.6 (32.4%)
B	枯死	20~25	76	18	80.9	34 (42.1%)	30.0 (51.0%)	32.7 (44.9%)
C	枯死	10	50	44	53.2	39 (31.6%)	28.5 (54.4%)	31.2 (48.3%)
D	枯死	20	24	58	29.3	38 (33.6%)	31.4 (47.9%)	26.9 (57.9%)
D	枯死	20	29	0	100.0	38 (33.6%)	31.4 (47.9%)	26.9 (57.9%)
D	穿入生存	20	0	0	-	38 (33.6%)	31.4 (47.9%)	26.9 (57.9%)
D	穿入生存	20	0	0	-	38 (33.6%)	31.4 (47.9%)	26.9 (57.9%)

各個体の円盤採取高、カシナガの生存数及び死亡数と生存率、各調査地の含まれる1 kmメッシュの2023年度の外気温及び地上高0 cmの氷点下日数推定値、平年の地上高0 cmの氷点下日数推定値を示す。各氷点下日数のカッコ内は伊藤（2024）をもとに推定される当該氷点下日数でのカシナガ生存率。範囲の示してある円盤採取高は株によって採取高が異なっていたことを示す。

4. カシナガの越冬状況

調査地B～Dでは枯死木からカシナガの生存個体が確認され、調査地B及びCの平均生存率は80.9%と53.2%、調査地Dの枯死木では29.3%と100%であった（表－6）。一方、調査地Aの半枯れ木及び調査地Dの穿入生存木ではカシナガの孔道は確認できたものの、いずれの個体からも生存個体は確認されず、特に調査地Dの穿入生存木では死亡個体についても1頭も見つからなかった。

各調査地の2023年度の氷点下日数をみると、外気温では最も少ない調査地Bでも34日であった。地上高0 cmの樹幹内氷点下日数の推定値では、カシナガの生存率が50%を超えていた3地点（B, C, D）はそれぞれ30日、28.5日、31.4日であった。調査地Dは2023年度の推定値ではカシナガの生存率が50%以上となる氷点下日数30日より氷点下日数が多かったものの、平年値ではこの4地点の中で最も氷点下日数が少なく、26.9日であった。

考察

1. 樹幹内温度に対する積雪の影響

本研究では、気温データに加えて積雪データを用いることで、カシナガの穿入が集中する地際部の樹幹内部温度を精度よく推定することが可能となり、北海道においても地際部の樹幹内氷点下日数が30日以下（カシナガの越冬生存率50%以上）となる地点が存在することが示された。

現地測定による樹幹内部の氷点下日数は地上高0 cmが最も少なく、地上高40 cmと比べて7割程度しかなかった。今回の調査地では、最大積雪深の平均値が2022年は93.7 cm、2023年は60.6 cmであり、一部の場所では積雪が40 cmに一度も達しなかった（表－4）。そのため、全体として地上高0 cmに比べ40 cmでは積雪によって保温された期間が短く、40 cm程度でも積雪の影響が小さくなったと考えられる。一方で、このような寡雪環境でもカシナガの穿入が集中する地際部では氷点下日数が少なかった。このことは、カシナガの越冬可能

性を評価する際に積雪を考慮する必要性を強く支持する結果である。

地際部の樹幹内氷点下日数は、外気温に加えて最大積雪深で説明された。積雪による保温効果は積雪深が増えるほど大きくなるが、20 cmを超えると外気温の日変化による雪温の変動が大幅に減少する傾向がみられ（小島ら1971）、40 cmを超えると地際部の樹幹内温度も一定となる報告がある（新田ら2023）。そのため、地際部の氷点下日数を推定するには保温されている期間を代表するパラメータが重要と考えられる。本調査地では、積雪深が40 cmに満たない場所や異常高温により厳冬期に消雪してしまった場所が何カ所もあり、今回は、積雪により地際部が保温されている期間を代表するパラメータとして最大積雪深が採用されたと考えられる。

2. カシナガの越冬可能性

2023年に確認されたナラ枯れ木のうち、枯死木におけるカシナガの生存率はすべての地点で50%を超えていた（表－6）。既往研究から、越冬生存率には温度条件が重要であることが分かっている（江崎2008、伊藤2024）。今回の被害地では外気温の氷点下日数は34日～48日であり、伊藤（2024）をもとにするとカシナガは半数も越冬できない環境であった。しかし、地上高0 cmの樹幹内氷点下日数の推定結果は、調査地BとCにおいて30日以下と50%以上の越冬生存が可能な条件であり、積雪による保温効果がモデルにて適切に評価できていることを示している。調査地Dでは、2023年度の樹幹内氷点下日数推定値が31.4日とそれほど少なくなかった一方で、ミズナラ1個体では100%の生存率であった。この原因として、微地形の影響と農研機構メッシュ気象データの誤差が考えられる。積雪深は1 m～1 km程度のスケールの微地形によって大きく変化することが分かっている。しかし、農研機構メッシュ気象データによる積雪の推定には微地形が考慮されていない（小南ら2015）。加えて、農研機構メッシュ気象データの積雪データは積雪深の推定に課題が残っているこ

とも指摘されている（小南ら2015）。樹幹内氷点下日数の推定精度向上には積雪データの改良が必要と思われるが、樹幹内氷点下日数の推定結果及び実際の越冬状況において50%以上のカシナガの越冬生存がみられたことは、北海道内にカシナガの生存に適した環境が存在することを示す重要な結果である。

調査地Aの半枯れ木や調査地Dの穿入生存木ではカシナガの越冬が確認できなかった。これまでの研究から、穿入生存木では樹木側の抵抗によりカシナガの生存率が低いことが分かっている（小林・上田2005）。そのため、半枯れ木や穿入生存木では、ミズナラの抵抗反応により生存個体がいなかった可能性がある。また、調査地Aは全調査地点の中で最も氷点下日数の多い場所であった。気温は冬期の死亡率に加え、冬までの発達程度にも影響する。カシナガは越冬するためには終齢幼虫に達する必要があるが（衣浦1994）、調査地Aの円盤からは終齢幼虫の越冬場所である幼虫室（樹木の繊維方向に掘られた1cmほどの孔道）が確認できなかった。調査地Aにおいては、低温による発育不良も越冬幼虫がいなかった理由として考えられる。

3. ナラ枯れの危険性

本研究のハザードマップでは、現在ナラ枯れやカシナガの生息が確認されていない上ノ国町～江差町の沿岸部においても生存率が10%以上の地域が広く存在すると予想された（図-3）。江差町周辺は対馬暖流の影響で北海道では比較的温暖な気候である。植生もヒノキアスナロの北限であるなど（林1952）東北地方と類似している。そのため、ナラ枯れが蔓延している東北地方と同じような気候条件であり、カシナガの越冬可能性は十分にある。ナラ枯れの新規被害は前年被害木の周囲2km圏内に大半が発生するほか（小林・上田2005）、被害の最大拡大距離としては岐阜県で25.5 km（大橋2008）、新潟県で28.5 km（布川2007）といった報告がある。現状では上ノ国町や江差町は2023年の被害木からは40 km以上離れており、直接カシナガが飛来し被害が発生する可能性は極めて低いと考えられる。ただし、このような場所でも被害材の持ち込み等により人為的にカシナガが持ち込まれた場合は、越冬・繁殖し、被害が拡大する恐れがある。事実、岩手県では2013年にこれまでの被害地から70km以上離れた場所で新たな被害が発生しており、この原因として東日本大震災後の復興資材等に紛れて移入してきた可能性が指摘されている（中村2016）。そのため、現在の被害地域から離れていても、カシナガの越冬が懸念される地域ではナラ材の利用の際には、被害地域からの材を持ち込まない、あるいはチップ化・薪化してカシナガが繁殖できない形で持ち込むなど、防疫の徹底に細心の注意を払う必要がある。

2023年度の樹幹内氷点下日数の予測結果では、カシナガの生存率が10%を超える地点が平年の1.75倍に及んでいたと予

想された。2023年度の冬（2023年12月～2024年2月）は全国的に記録的な高温であり、道南地域においても江差で1月の月平均気温が過去最高になるなど、冬期（12月～2月）の平均気温が平年よりも1℃以上高かった（気象庁2024）。現在の温暖化予測では、北日本日本海側における冬期の平均気温が21世紀末には20世紀末よりも1.8℃～5.2℃上昇するとされている（気象庁2020）。現状ではカシナガの越冬可能な環境は松前半島に限られているが、このまま温暖化が進めば亀田半島やより広域にカシナガの越冬可能な場所が拡大する可能性がある。そのため、一度北海道内にカシナガが定着すると、温暖化の進行とともにナラ枯れが北上し、対策が困難になると予想されることから、ナラ枯れの早期対策がより重要である。

今回の予測結果では、松前半島内陸部の高標高域にも越冬可能な環境が存在していた。越冬可能と評価された地点は外気温の氷点下日数が4か月に達するような寒冷な環境であったが、同時に最大積雪深が200 cmを超える場所でもあった。多雪地帯では、雪の断熱効果で厳冬期でも地温がプラスに維持されるため（石井・佐藤2012）、今回の予測のように高標高域でもカシナガが越冬できる可能性はある。一方で、多雪環境であっても積雪深が少ない段階で冷え込む場合には地温が氷点下となり、その後の降雪によって氷点下で維持されることもある（小島1972）。この場合は今回の予測よりも氷点下日数が増えると推測される。高標高域等の多雪・低温環境での樹幹内氷点下日数を正確に予測するためには、データを拡充させて予測性能を向上させる必要がある。

4. まとめ

これまで、北海道では冬期の低温によって生存率が下がるため、ナラ枯れの被害拡大速度は遅いと考えられてきた。しかし、現在北海道で確認されている被害地域周辺では、平年でもカシナガの越冬生存率が50%以上と予測された。本州では、カシナガは1つの孔道から20頭～80頭の次世代の脱出があるとされている（西村ら2007）。江崎（2008）では本州のようなプラス気温の環境では越冬生存率はほぼ100%とされている。脱出数に対して越冬以外の要因の影響が少ないないとする、越冬生存率50%の地域では脱出数も約半分になると仮定でき、20頭～80頭の半数である10頭～40頭が脱出すると推定される。現在見つかっている北海道の被害木は穿入孔数が多くて20個程度である（内田ら 印刷中）。これをもとに今回の被害地周辺における被害木からの脱出数を計算すると、10頭～40頭/孔×20孔＝200頭～800頭もの次世代の脱出が起きると予想される。2023年と同程度の穿孔が起きるとみなすと、1つの穿入孔にはオスとメス1匹ずつ必要なので、単純計算で1本の被害木から新たに5～20本の被害木が発生する計算となる。実際には、越冬生存率が100%であった被害木も見つかっているため、さらに多くの被害が発生す

る可能性がある。2023年度は確認した全被害木を駆除しているが、もし見落としや駆除ができない個体が発生すると、幾何級数的に被害木が増加してナラ枯れの急拡大を招く恐れがある。そのため、北海道におけるナラ枯れの蔓延を防ぐためにも、ハザードマップをもとに、越冬可能性の高い地域で確実に駆除することが必要である。また、今回作成したハザードマップに加えて、カシナガの生息密度を評価・組み合わせることができれば、新規被害木の発生予測にも活用できる。カシナガのようなキクイムシ類の生息密度の評価には、トラップ調査や前年被害木の位置情報などが有効である (Fettig and Hilszczański 2015, Kondoh et al. 2013)。ナラ枯れ被害の予測や拡大防止のためにも、確実な被害木の検出やトラップによるモニタリングが重要となる。一方で、今回推定したハザードマップは気象条件のみに基づいているが、ナラ枯れの発生場所には周辺植生や地形も影響するとされている (Kondoh et al 2013)。そのため、被害状況の調査や高精度な植生情報の構築等により、より推定精度を高めるための研究を続ける必要がある。2023年度は北海道で初めて被害が確認されたほか、青森県の北端被害地の被害量が前年比20倍に拡大している (東北森林管理局 未発表)。北海道内でのナラ枯れ蔓延を防ぐために、今回作成したハザードマップ等を活用して早期に被害を予測し対策体制を整え、適切に対処できるよう万全を期して臨む必要がある。

謝辞

本研究は生物系特定産業技術研究支援センターのイノベーション創出強化研究推進事業 (体系的番号JPJ007097)「With/Post ナラ枯れ時代の広葉樹林管理戦略の構築」(課題番号04021C2)により実施した。本研究の立案・実施に対して、小野寺賢介博士に尽力いただいた。渡島総合振興局西部森林室及び北海道水産林務部林務局森林整備課には調査地の選定、提供に協力いただいた。松前町森林組合及び福島町森林組合にはカシナガ越冬調査のための伐倒作業を実施いただいた。また、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所北海道支所の尾崎研一博士、上田明良博士、小林卓也博士には円盤からのカシナガ採取に協力いただいたほか、モデルの開発にあたり貴重な意見をいただいた。記して謝意を表する。

引用文献

- Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1–48. doi: 10.18637/jss.v067.i01
- 江崎功二郎 (2008) ナラ集団枯損被害の抑制メカニズムの解明. 公立林業試験研究機関研究成果選集 5: 25–26
- Fetting CJ, Hilszczański J (2015) Management strategies for bark beetles in conifer forests. In: Vega F, Hofstetter R (eds) *Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species*,

- 555–584, Academic Press, Elsevier, London
- 林 彌榮 (1952) 日本産重要樹種の天然分布 針葉樹第2報. 林業試験場研究報告 55: 1–251
- 石井吉之・佐藤大輔 (2012) 積雪底面融解量の場所による変化と流域平均量. 北海道大学地球物理学研究報告 75: 59–71
- 伊藤昌明 (2024) ナラ枯れ被害材の低温保管処理によるカシノナガキクイムシの越冬耐性調査. 令和5年度青森県産業技術センター林業研究所報告 20–24
- 鎌田直人 (2002) カシノナガキクイムシの生態. *森林科学* 35: 26–34
- 衣浦晴生 (1994) ナラ類の集団枯損とカシノナガキクイムシの生態. *林業と薬剤* 130: 11–20
- 気象庁 (2020) 日本の気候変動2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 (詳細版). https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_shousai.pdf (2024年9月30日確認)
- 気象庁 (2024) 2023年～2024年の冬(12月～2月)の天候. <https://www.data.jma.go.jp/cpd/longfcst/seasonal/202402/202402s.html#:~:text=%E6%A6%82%E6%B3%81.%20%E5%86%AC%E5%9E%8B%E3%81%AE%E6%B0%97%E5%9C%A7%E9%85%8D> (2024年9月30日確認)
- 小林正秀・萩田 実 (2000) ナラ類集団枯損の発生経過とカシノナガキクイムシの捕獲. *森林応用研究* 9: 133–140
- 小林正秀・上田明良 (2005) カシノナガキクイムシとその共生菌が関与するブナ科樹木の萎凋枯死一発生被害要因の解明を目指して一. *日本森林学会誌* 87: 435–450
- 小泉匡平・鎌田直人・小池孝良 (2013) ナラ枯れとカシノナガキクイムシー北陸のナラ枯れ現場から一. *北方林業* 65: 52–55
- 小南靖弘・広田知良・井上 聡・大野宏之 (2015) メッシュ農業気象データのための積雪水量推定モデル. *雪氷* 77: 233–246
- Kondoh H, Yamanaka T, Saito S, Shoda-Kagaya E, Makino S (2013) Development of a hazard map for oak wilt disease in Japan. *Agricultural and Forest Entomology* 17: 205–213. doi: 10.1111/afe.12098
- 小島賢治・小林大二・小林俊一・秋田谷英次・成田英器・石川信敬 (1971) 札幌の平地積雪断面測定資料報告 昭和43～44年冬期. 低温科学物理篇資料集 28: 25–36
- 小島賢治 (1972) 札幌市の平地積雪の温度: 1963–64～1968–69年の積雪断面測定資料より. 低温科学物理篇資料集 29: 15–20
- 黒田慶子 (2011) ナラ枯れの発生原因と対策. *植物防疫* 65: 162–165
- 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. *日本森林学会誌* 94: 316–32

- 中島春樹・松浦嵩遠（2015）「ナラ枯れ」はその後どうなったのか？. 富山農林水産総合技術センター森林研究所研究レポート 10: 1-8
- 中村克典（2016）岩手県三陸地方で拡大しつつあるナラ枯れ被害. 樹木医学研究 20: 118-119
- 西村正史・松浦嵩遠・高島幸司・小林裕之（2007）ナラ類集団枯損を引き起こすカシノナガキクイムシの富山県における生態と防除. 富山県林業技術センター研究報告 20: 1-10
- 新田紀敏・和田尚之・小野寺賢介・内田葉子（2023）冬期間のミズナラ樹幹の温度分布—美瑛市光珠内での事例. 北方森林研究 71: 15-19
- 布川耕市（2007）新潟県におけるナラ類集団枯損被害の地域分布と拡大経過. 新潟県森林研究所研究報告 48: 21-32
- 大橋章博（2008）岐阜県におけるナラ類枯損被害の分布と拡大. 岐阜県森林研究所研究報告 37: 23-28
- 大橋章博（2015）冬期の気温がカシノナガキクイムシの発生に及ぼす影響. 中部森林研 63: 11-14
- 尾崎研一（2024）ナラ枯れの北海道への侵入と今後の防除への提言. 森林技術 984: 32-35
- Ozaki K, Ueda A, Tokuda S, Wada H, Kitajima H（2021）First report of an ambrosia beetle, *Platypus quercivorus*, vector of Japanese oak wilt, in Hokkaido, northern Japan. Journal of Forest Research 26: 152-154. doi: 10.1080/13416979.2020.1860453
- R Core Team（2024）. R: A Language and Environment for Statistical Computing
- 内田葉子・和田尚之・雲野明・徳田佐和子・升屋勇人・小林卓也・上田明良・尾崎研一（印刷中）北海道でのナラ枯れ初被害における被害木の特徴. 日本森林学会誌

Summary

Japanese oak wilt (JOW) is caused by *Platypus quercivorus*, the vector of pathogens, and becomes serious issue especially for *Quercus crispula*. In Hokkaido, JOW was confirmed for the first time in 2023, and the hazard of JOW needs to be urgently evaluated to prevent its spread. Because low temperature greatly affects the survival of *P. quercivorus* in cold regions, we aimed to visualize JOW hazard by predicting the inside temperature of tree trunk, where *P. quercivorus* larvae overwinter, from several meteorological data; air temperature and snow depth. As a result of measuring trunk inner temperature during winter, the number of days below zero at 0 cm above ground was significantly less than at 40 cm above ground, meaning most suitable position at root collar for overwinter. As a result of estimating the number of days below zero at 0 cm above ground from air temperature and snow cover data, it could be predicted with the accuracy of 0.21 ± 5.06 days (mean $\pm$ SE) from the number of days below zero of air temperature

and maximum snow depth. Calculating the JOW hazard from this prediction equation, the percentage of overwinter survival of *P. quercivorus* larvae was over 10% in coastal area from northern part of Esashi to northern part of Shiriuchi. In addition, warmer winter of 2023 resulted in high risk even in coastal area of Setana and Eastern part of Kameda Peninsula. The percentage of overwinter survival of *P. quercivorus* larvae was over 50% in damaged stand of JOW in 2023, and more than half of *P. quercivorus* larvae actually survived. It is necessary to utilize this hazard map, predict JOW damage areas early, establish control systems, and make efforts to prevent JOW damage spread in Hokkaido.

Key words

Platypus quercivorus, Hazard map, *Quercus crispula*, Trunk temperature